POŠT., TELEGR. - TELEF. I RADIO
BIBLIOTEKA

# MEĐUGRADSKI TELEFONSKI KABLOVI

NAPISAO
DR. ING. A. ENGELHARDT

UREDNIK
ING. DUŠAN MILOSAVLJEVIĆ

23131

POŠT., TELEGR.-TELEF. I RADIO
BIBLIOTEKA

# MEĐUGRADSKI TELEFONSKI KABLOVI

*NAPISAO*
Dr. Ing. ENGELHARDT
*PREVEO S II NJEMAČKOG IZDANJA*
Ing. DUŠAN V. POPOVIĆ

*UREDNIK*
*INZ. DUŠAN MILOSAVLJEVIĆ*
direktor pošta i telegrafa
ZAGREB
1933

*Tisak*
*Zaklade Tiskare*
*Narodnih Novina, Zagreb*

# SADRŽAJ

Strana

Predgovor pisca i uvodna riječ urednika . . . . . 6
1. Krarupirane linije . . . . . 11
2. Pupinizirane linije. Lančani krug linija sa ovojnicima . 15
3. Pupinove ovojnice . . . . . 37
4. Iskorišćenje fantomnih krugova u međugradskim kablovima . . . . . 43
5. Preslušavanje (Diafonija) . . . . . 55
6. Smetnje uslijed jakih struja . . . . . 83
7. Amplifikator za izmjeničnu struju. Elektronska struja i katodne cijevi sa usijanom katodom i visokim vakumom. Željezni otpornik . . . . . 108
8. Antidistorzija amplituda . . . . . 127
9. Način vezivanja amplifikatora. Dvožična i četverožična telefonija. Distorzija uslijed povratne sprege. Preslušavanje i zavisnost od temperature dugih linija snabdjevenih amplifikatorima . . . . . 131
10. Prelazna stanja. Tipovi linija za daleku telefoniju po kablovima . . . . . 156
11. Pojave odjeka . . . . . 163

*Sva prava*
*zadržava prevodilac i urednik*

# PREDGOVOR PISCA

Sve veće potrebe trgovine i saobraćaja dovele su u Evropi, Sjevernoj Americi i Japanu do izgrađivanja vrlo razgranjene mreže međugradskih telefonskih kablova, koji predstavljaju jedino sredstvo za svladavanje jakog telefonskog saobraćaja na velikim daljinama. Nema nikakve sumnje, da će se evroskoj kablovskoj mreži priključiti, čim ekonomske prilike dopuste potrebne investicije, i one zemlje koje još nemaju kablove za međugradski i međunarodni saobraćaj, a to su države na Balkanu, Španija i Rusija. Tada će Jugoslavija, kraj toga što će sama biti vezana kablovima sa evropskom mrežom, prema svome položaju igrati važnu ulogu i u tranzitnom saobraćaju Evrope sa Bugarskom, Turskom i Grčkom, a kasnije sa prednjom Azijom i Indijom.

Čini mi čast, što će moja knjiga o problemima telefonije na dugim kablovima u jugoslavenskom prijevodu, a u izdanju P. T. Biblioteke, biti pristupačnija zainteresiranim čitaocima u Jugoslaviji. Zahvaljujem gospodi, čijom je to inicijativom bilo, na njihovom napornom radu u interesu tehničkog napretka i nadam se, da će teoriji opisanoj u ovoj knjizi uskoro sljedovati plodonosna praksa u lijepoj jugoslavenskoj zemlji.

Nju-Jork, decembra 1933

*A. Engelhardt*

# UVODNA RIJEČ UREDNIKA

Evropska međunarodna i međugradska kablovska telefonska mreža čeka na naš kablovski priključak pa da i mi uđemo u najširu evropsku i svetsku telefonsku zajednicu u punom smislu reči. Tek tada će se moći preko nas dalje da širi živa telefonska ekspanzija Zapada na Balkan i na daleki Istok.

Preko Madžarske telefonski kabl za daleko telefonisanje od 63 linije došao je do Segedina i tu već više godina čeka na nas. Preko Austrije kabl je završen u Vildonu — kod Graca na našoj granici. On ima 49 linija. Preko talije izgrađen je telefonski interurbani kabl do Trsta i ima 54 linije.

Jedno, dakle, od prvoklasnih aktuelnih pitanja naših telekomunikacija jeste produženje međunarodnih kablova kroz našu zemlju. Ovim modernim sredstvom omogućiće se laka, sigurna i brza telefonska korespondencija celoga sveta sa nama i preko nas, što je za današnji unutrašnji i međunarodni život takav imperativ, da se on elementarnom silom nameće svakoj kulturnoj državi.

Makar da se sada palijativnim sredstvima kako-tako pomažemo u pogledu telefonskog saobraćaja sa inostranstvom, mi ćemo ipak kod ovakovog stanja stvari morati uskoro da započnemo rad na ovom našem krupnom saobraćajnom problemu.

U knjizi potpisatom: »P o b o l j š a n j e t e l e f. s l u ž b e u J u g o s l a v i j i«, koja je izašla 1932 god., bliže je pokazana između ostaloga važnost i način kako treba rešiti pitanje uvođenja međugradskih i međunarodnih telefonskih kablova kod nas.

Međutim, pre nego što bi se prešlo na ovaj zamašan posao, potrebno je da naši tehničari, koji će sudelovati u izgradnji ovih kablova kao i oni p. t. službenici koji treba da održavaju i eksploatišu buduće naše kablovske veze — budu dovoljno upoznati sa suštinom telefonskih kablova za velika odstojanja, njihovim funkcionisanjem i njihovim osobinama, i to najpre sa njihovom teorijom, a potom i sa njihovom tehnikom.

Za naše t. t. inžinjere potrebno je ovo teorisko upoznavanje kablova u širim stručnim razmerama, a za niže tehničko osoblje ono je potrebno u glavnijim potezima. Što se tiče svega ostaloga

našeg p. t. t. osoblja, koje će sudelovati u eksploataciji naših telef. kablova, i njemu će biti potrebno bar opšte poznavanje ovog grandioznog modernog objekta njihove struke koji je omogućio da je danas u pogledu dobrote i brzine telefonisanja kao i gustine kablovske mreže čitava Evropa postala tako reći jedan grad.

Iz navedenih razloga, za teorisko upoznavanje kablova za daleku telefoniju potpisati je sa prevodiocem G. inž. D. Popovićem odabrao odlično delo Gospodina Dr. Inž. A. Engelhardta, koji je bio ljubazan da dade autorizaciju za njegov prevod na naš jezik, založivši se da za naše izdanje dobijemo originalna klišea, na čemu mu potpisani odaje na ovom mestu osobitu blagodarnost.

Kako će u izdanju P. T. T. i R. Biblioteke, prema programu iznetom u prospektu o njenoj izgradnji, izaći naročita i posebna knjiga koja će obrađivati Elektrotehniku u opšte, u kojoj će se naći sva opšta znanja iz te grane nauke, to su izostavljeni prvi odeljci iz originala koji se bave opštom Elektrotehnikom. Tako su isto učinili Francuzi pri prevodu ovoga dela na svoj jezik.

U cilju pak smanjivanja volumena, isto tako su izostavljeni i pregledi izvorne literature kao i registar imena i predmeta. Iz istog razloga izuzetno nije dat u uvodu ni kratak izvod sadržaja.

Inače je ovo delo verno prevedeno. Moglo bi se reći da je ono dosta opširno za gro naših čitatelja; međutim, ono nije skraćivano iz prostog razloga da se nebi kvarila celina jedne zaista eminentne tvorevine ove vrste.

Ovo delo je, kao što se vidi, teoriske naravi. Ipak piscu je bila težnja da ono bude pristupačno što širem krugu t. t. tehničara te naučna i stručna izlaganja u ovoj knjizi prestavljaju minimum teorije i matematike koja su se morala zadržati da bi se objasnile osobine ovih i ovakvih telefonskih provodnika,

Naši inžinjeri naći će u ovome delu dovoljno stručnog izlaizlaganja da bi, studirajući odatle telef. kablove za velika odstojanja, mogli da steknu stručno teorisko poznavanje kako bi praktici njihovog polaganja i održavanja mogli pristupiti sa punom pouzdanošću. Naše opšte tehničko t. t. osoblje moći će (prelazeći preko matematičkih formula), posle pažljivog čitanja teksta, dobiti shvatanje o funkciji kablova i njihovim glavnim odlikama i glavnim karakteristikama. Sve ostalo naše p. t. t. osoblje, kada pročita ovu stručnu knjigu od prvorazredne vrednosti, dobiće opšte pojmove o tome šta su međugradski telefonski kablovi. Time će dopuniti svoja enciklopedijska znanja i o ovom problemu iz domena svoje struke. Iz ovoga dela videće se između ostaloga



i to koliko je naša p. t. t. struka u raznim pravcima duboko razvijena i koliko je potrebna najkompliciranija matematika i najsuptilnija teorija kako za analizu i razumevanje fenomena telekomunikacija tako isto i za izgradnju modernih srestava za prenos reči i znakova na daljinu. Isto tako će se videti na kako je dubokom teoriskom polju i problemu od prvoklasnog značaja za moderni svetski telefonski saobraćaj dao presudnu reč svojim odlučujućim pronalaskom naš Jugosloven — Srbin — Mihajlo Pupin rodom iz Idvora, sela u Banatu više Pančeva — čiji su »kalemovi« u zajednici sa amplifikatorima pomoću katodnih lampi — telefonskog relea — omogućili telefonisanje putem kablova na najveća odstojanja.

Napominje se pri kraju da je ovo izdanje teoriski deo knjige: »K a b l o v s k e t e l e f. l i n i j e« koja je predviđena u prospektu P. T. T. Biblioteke.

Mora se i ovde istaći da je ovakva teoriska knjiga, ma koliko ona bila od velikog značaja za našu stručnu p. t. t. i r. književnost i za velike ciljeve praktičnog boljitka naših telekomunikacija, mogla ugledati sveta samo blagodareći sistemu naše p. t. t. i r. B i b l i o t e k e pri kome se s v i m i i z n a š e s t r u k e što vodi cilju našeg opšteg i našeg specijalnog usavršavanja a time i opštem i specijalnom napredovanju i same naše p. t. t. struke kao i njenog podizanja na nivo ostalih kulturnih naroda.

inž. *Dušan Milosavljević*

# 1. KRARUPIRANE LINIJE

Može se čisto računski utvrditi, da se jedno uspješno sredstvo za smanjivanje linijskog gušenja sastoji u umjetnom povećavanju linijske samoindukcije. To pokazuje formula za spec. gušenje (na 1 km) linije sa ravnomjerno raspodjeljenom samoindukcijom $\beta \approx \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{A}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$ gdje $R$ znači omski otpor, $A$ odvod, $C$ kapacitet a $L$ samoindukciju na 1 km linije. U prvi mah buni se osjećaj protiv ovog teoretskog rezultata, pa ćemo radi lakšeg razumijevanja povoljnog djelovanja samoindukcije upotrijebiti jednu grubu mehaničku usporedbu. U mehanici samoindukciji odgovara težina tijela. Ako bacimo jedan put komadić papira, a drugi put kamen istom snagom, vidjeti ćemo da će kamen dalje odletjeti pošto on baš zbog svoje veće težine bolje svladava otpor zraka.

Još je bliže isporedba sa prenosom visokog napona. Pošto gubitci uslijed otpora vodne žice rastu sa kvadratom jakosti struje, to se za daleko prenašanje električne energije preporučaju male jakosti struja kod visokog napona i ako se na početku i na kraju linije napon mora transformirati. Uvođenje umjetne samoindukcije u govorni krug jeste sredstvo, da se odnos između napona i struje t. j. v a l n i o t p o r, poveća. Valni otpor običnog kabela iznosi za 800 Herca oko 350 Oma, krarupiranog kabela 600 Oma a normalnog pupiniziranog kabela 1600 Oma. Iz ovoga se već vidi, da je pupinizirana linija mnogo bolja od krarupirane u odnosu prema smanjenju gušenja.

Samoindukcija na kilometar duljine duple linije, sa promjerom žice $r$, povećava se približno za $4\ (\mu - 1)\ \frac{\delta}{r} \cdot 10^{-4}$H kad se žice omotaju željeznim slojem debljine $\delta$ i permeabiliteta $\mu$ (u elektromagnetskim jedinicama). Danski inžinjer Krarup dao je ideju (1902), da se takav magnetni aktivan omotač izvede kontinualnim omatanjem bakrenog voda s jednim ili dva sloja tanke željezne žice ili traka kod čega ostaje potpuno očuvana homogenost linije u pravcu duljine. Za telefonske svrhe pretpostavlja se omatanje sa žicom što manjeg presjeka čime se smanjuju gubitci uslijed vrtlož-

nih struja. Povećanje debljine namotaja željezne žice u cilju povećanja samoindukcije bez svrhe je, pošto gubitci uslijed cikličnog magnetiziranja željezne jezgre tako povećaju efektivni optor krarupirane linije, da se postignuto smanjenje gušenja, pomoću veće samoindukcije, opet gubi.

Larsenova teorija, koja je dugo vrijedila za ovu vrstu linija, pretpostavljala je, da linije sila, koje kruže oko voda, moraju prebroditi zračni prostor između dviju susjednih spirala željezne žice. Novija iskustva dobivena u njemačkom telegrafsko-telefonskom institutu pokazuju, da je »efektivni« permeabilitet Krarupovog namotaja jedva nešto manji od cikličnog permeabiliteta mjerenog na žicama prije namatanja, što pokazuje da magnetske silocrte idu skoro potpuno za spiralama namotaja. Breisig je našao kao kilometarsku vrijednost samoindukcije Krarupiranog kruga.

$$L = \left( 4 \ln \frac{d}{r} + \mu \frac{16 \pi n \delta^2}{2r + \delta} + 1 \right) \cdot 10^{-4} \text{ H/km} \qquad (1)$$

Ovdje znači:

$\mu$ permeabilitet, u alektromagnetskim jedinicama, žice za omatanje,

$r$ polumjer bakrene žice,

$\delta$ debljinu namotaja,

$d$ razmak osi dovodne i odvodne žice,

$n$ broj navojaka Krarupovog namotaja na jedinicu duljine.

Većinom upotrijebljavano čisto švedsko željezo ima permeabilitet oko 160 elektromagnetskih jedinica pa se dobiva samoindukcija od 10 do 17 m H/km. Legure sa oko 30% nikla smanjuju nešto permeabilitet, ali istodobno i gubitke uslijed cikličnog magnetiziranja a prema tome i efektivni otpor krarupiranog voda. Dodatak silicija povećava permeabilitet a istodobno i gubitke uslijed cikličnog magnetiziranja i efektivni otpor, tako da postignuto smanjenje gušenja uslijed povećane samoindukcije (do 25 m H/km) opet postane nešto manje.

Još se ne može definitivno odgovoriti, da li će imati značaja za povećanje samoindukcije telefonskih linija, bilo po Krarupovom bilo po Pupinovom načinu, legure željeza i nikla, kao što su p e r m a l o j ili p e r m i n v a r-pronalasci Western Electric Co. Permaloj se sastoji iz 21,5% željeza i 78,5% nikla. Pogodnim toplinskim postupkom može se kod njega postići vrlo visok početni permeabilitet do 13.000 elektromagnetskih jedinica. Ali je permaloj vrlo osjetljiv prema mehaničkim i magnetskim utjecajima. Perminvar, naprotiv, stabilniji je od samog željeza. On se sastoji iz 30% željeza, 45% nikla i 25% kobalta. Kod njega je postignut ciklični permeabilitet nezavisan od jakosti polja od 500 elektromagnetskih jedinica sa vrlo malim gubitcima uslijed histereze. Permaloj je već u nekoliko slučajeva upotrijebljen sa odličnim uspjehom za povećanje samoinduscije podmorskih (prekooceanskih) telegrafskih kablova, namatanjem u obliku traka oko bakrenog provodnika.



Znamo da gubitci uslijed histerezije i naknadni gubitci rastu proporcionalno frekvenciji a gubitci uslijed vrtložnih struja proporcionalno kvadratu frekvencije. Otpor gubitka Krarupove linije ne raste dakle proporcionalno frekvenciji već brže i prouzrokuje distorziju amplituda prenesenog govora.

Ako hoćemo izračunati gušenje i valni otpor Krarupovog kabla iz njegove četiri osnovne električne vrijednosti, moramo se poslužiti formulama, pošto su veličine $R$ i $j\omega L$ istoga reda.

$$\gamma = \beta + j\alpha = \sqrt{(R + j\omega L)(A + j\omega C)} \text{ и } \mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{A + j\omega C}}$$

Izvesti ćemo jedan primjer, radi prikazivanja načina računanja. Jedna Krarupova dupla linija, čija žica ima promjer 1,8 m omotana je sa dva sloja žice od mekog željeza debljine 0,2 m i izolirana papirom i zrakom. Električne vrijednosti ove linije za 800 Herca ($\omega = 5000$) iznose:

$R_{\text{eff}} = 15{,}5$ Oма/km, $A = 1$ μS/km, $L = 13$ m H/km, $C = 0{,}05$ μ F/km

Prema jednadžbi $\gamma = \beta + j.\alpha = \sqrt{(R + j\omega L)(A + j\omega C)}$ biti će:

$$\gamma = \sqrt{(15{,}5 + j\ 5000 \cdot 0{,}013)\ (1.10^{-6} + j\ 5000,\ 0{,}05 \cdot 10^{-6})}$$

$$= 10^{-3} \sqrt{(15{,}5 + j\ 65)\ (1 + j\ 250)}$$

$$\sqrt{(15{,}5^2 + 65^2} = 66{,}8, \quad \sqrt{250^2 + 1^2} \approx 250$$

$$\frac{65}{15{,}5} = 4{,}19 = \operatorname{tg} 76^\circ 34', \quad \frac{250}{1} = 250 = \operatorname{tg} 89^\circ 46'$$

$$\gamma = 10^{-3} \sqrt{66{,}8 \cdot e^{j\,76^\circ 34'} \cdot 250 \cdot e^{j\,89^\circ 46'}}$$

$$= 10^{-3} \sqrt{16700 \cdot e^{j(76^\circ 34' + 89^\circ 46')}} = 129 \cdot 10^{-3} \sqrt{e^{j\,166^\circ 20'}}$$

$$= 0{,}129 \cdot e^{j\frac{166^\circ 20'}{2}} = 0{,}129 \cdot e^{j\,83^\circ 10'} = \beta + j\alpha$$

shodno jednadžbi za prividni otpor $R_s \cdot e^{j\varphi} = R_s \cdot \cos\varphi + jR_s \cdot \sin\varphi$ biti će:

$$\beta = 0{,}129 \cdot \cos 83^\circ 10' = 0{,}129 \cdot 0{,}119 = 0{,}154 \text{ Nepera/km}$$

$$\alpha = 0{,}129 \cdot \sin 83^\circ 10' = 0{,}129 \cdot 0{,}993 = 0{,}128$$

A prema jedn. $\mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{A+j\omega L}}$ biti će:

$$\mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{15{,}5 + j\,5000 \cdot 0{,}013}{1 \cdot 10^{-6} + j\,5000 \cdot 0{,}05 \cdot 10^{-6}}} = 10^3 \sqrt{\frac{66{,}8 \cdot e^{j\,76^\circ 34'}}{250 \cdot e^{j\,89^\circ 46'}}}$$

$$= 10^3 \sqrt{0{,}267 \cdot e^{j\,(76^\circ 34' - 89^\circ 46')}} = 10^3 \cdot 0{,}517 \sqrt{e^{-j\,13^\circ 12'}}$$

$$= 517 \cdot e^{-j\frac{13^\circ 12'}{2}} = 517 \cdot e^{-j\,6^\circ 36'} \text{ Oma}$$

$$R_r = 517 \cdot \cos(-6^\circ 36') = 517 \cdot 0{,}994 = 514 \text{ Oma}$$

$$R_i = 517 \cdot \sin(-6^\circ 36') = -517 \cdot 0{,}115 = -59 \text{ Oma}$$

Za Krarupovane linije sa jednim slojem žice od mekog željeza dobivaju se za 800 Herca slijedeće vrijednosti:

Tablica I

| ① mm | R Oma/km | | A μS/km | | L mH/km | | C μF/km | | β Nepera/km | | Z (vredn.) Oma | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | par | fant. | par | fant. | par | fant. | par | fant. | par | fant. | par | fant. |
| 1,2 | 32,7 | 16,4 | 0,8 | 1,2 | 14 | 7 | 0,040 | 0,068 | 0,027 | 0,025 | 620 | 340 |
| 1,4 | 24,6 | 12,3 | 0,8 | 1,2 | 13 | 6,5 | 0,042 | 0,072 | 0,022 | 0,020 | 570 | 320 |
| 1,5 | 21,6 | 10,8 | 1,0 | 1,5 | 12 | 6 | 0,043 | 0,073 | 0,020 | 0,019 | 540 | 300 |
| 1,8 | 15,5 | 7,8 | 1,0 | 1,5 | 10,5 | 5,25 | 0,045 | 0,077 | 0,016 | 0,015 | 490 | 270 |
| 2,0 | 12,9 | 6,4 | 1,0 | 1,5 | 9,5 | 4,75 | 0,046 | 0,079 | 0,014 | 0,013 | 460 | 250 |

O važnosti fantomnih krugova govoriti će se u odjeljku 5. Brojevi koji su tamo navedeni za gušenje kod normalnog pupiniziranog kabla (tablica II) pokazuju veliku nadmoćnost pupiniziranih kablova prema krarupiranima. Radi ovog razloga Krarupovi kablovi, prema sadašnjem stanju tehnike, nemaju nikakav osobiti značaj za dalnju telefoniju. Do prije nekoliko godina imali su Krarupovi kablovi prvenstvo u oblasti podmorskih telefonskih kablova, ali su i ovdje odnijeli pobjedu Pupinovi kablovi zbog veće ekonomičnosti, pošto je u svakom pogledu bio riješen problem polaganja kablova sa elastičnim mufovima koji su sadržavali ovojnice.

Oblast gdje se primijenjuje Krarupovi kablovi jeste u gradovima gdje se sa periferije imaju podzemno dovesti zračne međugradske linije do centrale, odnosno uza željezničke stanice gdje je potrebno da se zračne linije stave pod zemlju ili u tunelima. Za ove svrhe Krarup-kablovi su naročito pogodni zbog svoga valnoga



otpora koji je približno jednak valnom otporu zračnih linija (oko 600 Oma). Prema tome na mjestima prelaza nema gubitka energije uslijed refleksije, kao kad bi se uzeo običan kabel čiji je valni otpor oko 350 Oma. Isti problem može se riješiti lakim pupiniziranjem uvodnih ili prolaznih kablova pomoću ovojnica sa slabom samoindukcijom. Naravno da bi se mogli primijeniti i translatori prilagođeni za obje strane, ali u ovima se opet javljaju gubitci a kraj toga komplicira se prenašanje signalnih istosmjernih struja. Što se tiče promjera provodnika uvodnih i prolaznih kablova moglo bi se reći slijedeće: Treba nastojati, da umetnuti kablovi ne doprinesu povećanju gušenja t. j. oni moraju imati isti koeficijent gušenja kao i zamijenjena zračna linija. Brončanoj liniji od 2 mm odgovara u ovom pogledu lako pupinizirani kabel sa žilama promjera 1,9 mm ili Krarupkabel sa žilama od 2,5 mm dvostruko omotanim željeznom žicom od 0,3 mm. Radi ekonomskih razloga često ćemo se zadovoljiti kablovskim provodnicima manjega presjeka, makar će se gušenje nešto povećati.

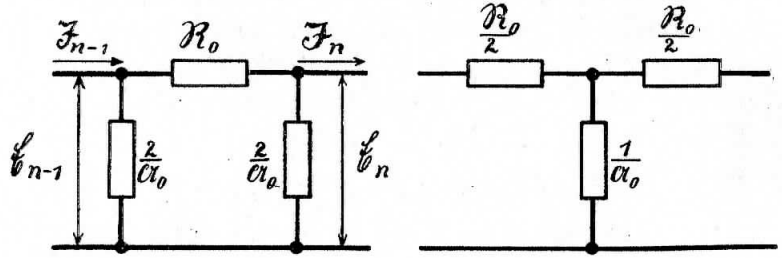
## 2. PUPINIZIRANE LINIJE

### Lančani krug linija sa ovojnicama

Englez Heaviside upozorio je još 1886 god. na to, da se međugradska linija može opteretiti mjestimičnim umetanjem samoindukcije. Srbin, profesor u Americi, Mihajlo Pupin razradio je Hevisideovu teoriju za praksu i prijavio je 1899 godine radi patentiranja ideju, da pravilni razmaci ovojnica koji se imaju upotrijebiti za ovu svrhu moraju biti mali prema duljini vala titranja koja se imaju prenijeti. Pupin je prodao svoj pronalazak firmi Western Electric Co. za Ameriku, a za ostali svijet firmi Siemens i Halske. Pupinov pronalazak za svoj primat u dalekoj telefoniji mora zahvaliti daljim radovima ovih dvaju svjetskih poduzeća. Glavna odlika Pupinovog prema Krarupovom kabelu jeste veći valni otpor (za normalno pupiniziranje oko 1600 Oma) čime se postiže smanjenje jakosti struje koja se prenosi, a prema tome i smanjenje uslijed gubitka otpora. Otpor opterećenog kabela povećava se neznatno, pošto prstenaste ovojnice predstavljaju najpovoljniji oblik, da se dobije jedna određena samoidukcija upotrebom što je moguće manjeg broja navojaka.

Kraj manjeg gušenja za srednje govorne frekvencije kod Pupinovog kabela slabije raste pravi otpor sa frekvencijom nego kod

Krarup-kabela, t. j. dobiva se manja distorzija amplituda. Druga jedna osobina Pupinovog kabela djeluje u istom smislu povoljno. Jednadžba $\mathfrak{Z} \approx \sqrt{\frac{R}{j\omega C}}$ i računski primjer u odjeljku 2 pokazuju, da je valni otpor običnih i Krarupovih kablova kapacitivnog karaktera. I kod Krarup-kablova prevladava više djelovanje kapaciteta nego samoinduktivnog opterećenja. Uslijed toga valni otpor kod obadvije vrste kablova pada kad frekvencija raste prema jednadžbi $\mathfrak{Z} \approx \sqrt{\frac{R}{j\omega C}}$ iako ne tako jako kao prividni otpor jednostavnog kondenzatora. Naprotiv valni otpor Pupinovog kabela raste u oblasti frekvencija koje nas interesiraju zajedno sa frekvencijom.




Slika 1

U gornjoj graničnoj oblasti govornih frekvencija javljaju se nove pojave uslijed nehomogenosti linija koja je nastala zbog mjestimičnog umetanja samoindukcionih ovojnica. Ove pojave poništavaju gore spomenutu dobit i spriječavaju prenašanje visokih frekvencija kao što ćemo to poslije vidjeti.

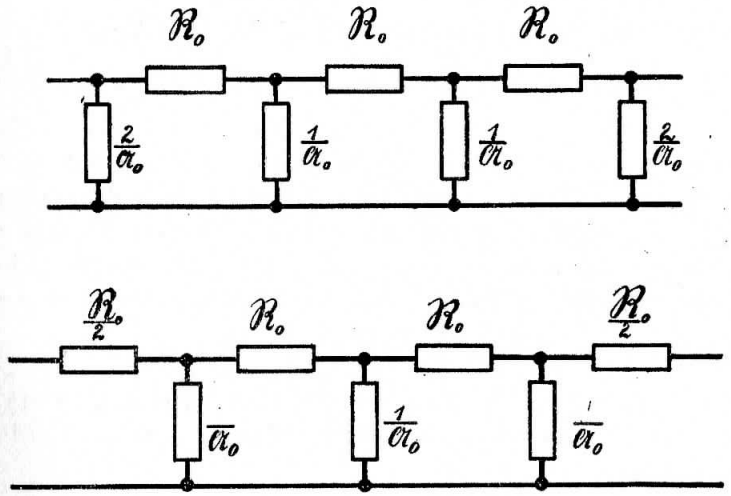
Za teoretsko objašnjenje funkcioniranja pupinizarane linije služi nam teorija »lančanog kruga«, koju je u novije vrijeme (1915) razvio K. W. Wagner a nezavisno od njega Amerikanac Campbell.

Pupinizirana linija jeste jedan naročiti oblik lančanog kruga, koji se sastoji iz dragovoljno velikog broja jednakih članova. Svaki član ima u redu i paralelno sa linijom prividne otpore $\mathfrak{R}_0$ odn. $\frac{1}{\mathfrak{A}_0}$ ($\mathfrak{A}_0$ prividna vodivost). Da članovi budu po duljini simetrični, podijeli se ili paralelno vezani otpor u dva dijela $\frac{2}{\mathfrak{A}_0}$ između kojih se veže redni otpor (lančani krug prve vrste), ili se redni otpor podijeli u dva dijela $\frac{\mathfrak{R}_0}{2}$ između kojih se veže paralelni otpor $\frac{1}{\mathfrak{A}_0}$ (lančani krug



druge vrste sl. 1 desno). Prema tome pravi se razlika između lančanog kruga prve vrste, koji počinje i svršava se sa polovinom paralelnog otpora (sl. 2 gore) i lančanog kruga druge vrste, koji počinje i svršava se sa polovinom rednog otpora (sl. 2 dolje). Mi ćemo se ograničiti na studiju lančanog kruga prve vrste, koji odgovara uobičajenom projektiranju pupiniziranih linija koji počinju i svršavaju se polovinom udaljenosti ovojnica.

Član lančanog kruga prvoga reda, prestavljen u sl. 1 lijevo neka je $n$-ti po redu, neka je ispred njega napon $\mathfrak{E}_{n-1}$ iza njega $\mathfrak{E}_n$. U taj član neka dolazi struja $\mathfrak{J}_{n-1}$ a iz njega neka ističe $\mathfrak{J}_n$. Na krajevima lijevog paralelnog otpora biti će dakle napon $\mathfrak{E}_{n-1}$ a na kra-




Slika 2

jevima desnoga $\mathfrak{E}_n$. Struja koja protiče kroz lijevi paralelni otpor biti će $\frac{\mathfrak{A}_0}{2}.\mathfrak{E}_{n-1}$, a kroz desni $\frac{\mathfrak{A}_0}{2}.\mathfrak{E}_n$.

Zbroj struja u paralelnim otporima jednak je razlici $\mathfrak{J}_{n-1} - \mathfrak{J}_n$ pošto je $\mathfrak{J}_n < \mathfrak{J}_{n-1}$:

$$\mathfrak{J}_{n-1} - \mathfrak{J}_n = \frac{\mathfrak{A}_0}{2}(\mathfrak{E}_{n-1} + \mathfrak{E}_n) \qquad (2)$$

Kroz redni otpor protječe struja $\mathfrak{J}_{n-1} - \frac{\mathfrak{A}_0}{2} \cdot \mathfrak{E}_{n-1}$ Pad napona u ovom prividnom otporu iznosi:

$\mathfrak{R}_0\left(\mathfrak{I}_{n-1} - \frac{\mathfrak{A}_0}{2}\cdot\mathfrak{E}_{n-1}\right)$ a poštoje $\mathfrak{E}_n < \mathfrak{E}_{n-1}$ biti će:

$$\mathfrak{E}_{n-1} - \mathfrak{E}_n = \mathfrak{R}_0\left(\mathfrak{I}_{n-1} - \frac{\mathfrak{A}_0}{2}\,\mathfrak{E}_{n-1}\right) \tag{3}$$

Obadvije ove jednadžbe slične su i dovode do sličnih rezultata za cijeli lančani krug (sa 4 člana) kao jedn. $dE_x = R\cdot d_x\cdot \mathfrak{I}_x$ za duge krugove istosmjerne struje sa odvodom odn. za duge krugove izmjenične struje jedn. $d\mathfrak{I}_x = A\cdot d_x\cdot E_x$ Ali posto ovdje imamo konačan broj članova konačne veličine, možemo izvesti točne rezultate. Možemo napisati:

$$\mathfrak{E}_n = \mathfrak{M}\cdot e^{n\gamma_0}, \qquad \mathfrak{E}_{n-1} = \mathfrak{M}\cdot e^{(n-1)\gamma_0} \text{ itd.} \tag{4}$$

$$\mathfrak{I}_n = \mathfrak{N}\cdot e^{n\gamma_0}, \qquad \mathfrak{I}_{n-1} = \mathfrak{N}\cdot e^{(n-1)\gamma_0} \text{ itd.} \tag{5}$$

gdje $\mathfrak{M}$, $\mathfrak{N}$ i $\gamma_0$ znače konstante cijelog lančanog kruga, i za koje treba naći odnose prema prividnim otporima $\mathfrak{R}_0$ i $\frac{1}{\mathfrak{A}_0}$ pojedinih članova.

Ovdje će $\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$ značiti konstantu prenosa lančanog kruga (za svaki član), $\beta_0$ konstantu gušenja (odnos drugih korjena energija na početku i kraju za svaki član lančanog kruga sa velikim brojem članova) i $\alpha_0$ konstantu duljine vala (ugao za koji se faza napona i struje pomiče u svakom članu lančanog kruga sa većim brojem članova). $\mathfrak{Z} = \frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{N}} = \frac{\mathfrak{E}_n}{\mathfrak{I}_n} = \frac{\mathfrak{E}_{n-1}}{\mathfrak{I}_{n-1}}$ i t. d. predočuje odnos napona i struje ispred ili iza ma kojeg člana lančanog kruga (prema tome i odnos napona i struje na početku kruga) t. j. valni otpor lančanog kruga.

Metnuti ćemo prednje izraze za

$$\mathfrak{N}\cdot e^{(n-1)\gamma_0} - \mathfrak{N}\cdot e^{n\gamma_0} = \frac{\mathfrak{A}_0}{2}\left(\mathfrak{M}\cdot e^{(n-1)\gamma_0} + \mathfrak{M}\cdot e^{n\gamma_0}\right)$$

Razdijeliti ćemo ovu jednadžbu sa $e^{(n-1)\gamma_0}$:

$$\mathfrak{N}\left(1 - e^{\gamma_0}\right) = \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{M}}{2}\left(1 + e^{\gamma_0}\right) \tag{6}$$

$$\mathfrak{Z} = \frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{N}} = \frac{2}{\mathfrak{A}_0}\cdot\frac{1 - e^{\gamma_0}}{1 + e^{\gamma_0}}$$

Na sličan način dobiva se iz jedn. 3:

$$\mathfrak{M}\cdot e^{(n-1)\gamma_0} - \mathfrak{M}\, e^{n\gamma_0} = \mathfrak{R}_0\left(\mathfrak{N}\cdot e^{(n-1)\gamma_0} - \frac{\mathfrak{A}_0}{2}\cdot\mathfrak{M}\cdot e^{(n-1)\gamma_0}\right)$$

$$\mathfrak{M}\left(1 - e^{\gamma_0}\right) = \mathfrak{R}_0\left(\mathfrak{N} - \frac{\mathfrak{A}_0\,\mathfrak{M}}{2}\right)$$



$$\mathfrak{M}\left(1 - e^{\gamma_0} + \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}\right) = \mathfrak{R}_0\cdot\mathfrak{N}$$

$$\mathfrak{Z} = \frac{\mathfrak{M}}{\mathfrak{N}} = \frac{\mathfrak{R}_0}{1 - e^{\gamma_0} + \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}} \tag{7}$$

Izrazi dobiveni u jedn. 6 i 7 moraju biti jednaki:

$$\frac{2}{\mathfrak{A}_0}\cdot\frac{1 - e^{\gamma_0}}{1 + e^{\gamma_0}} = \frac{\mathfrak{R}_0}{1 - e^{\gamma_0} + \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}}$$

$$\left(1 - e^{\gamma_0}\right)\left(1 - e^{\gamma_0} - \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}\right) = \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}\left(1 + e^{\gamma_0}\right)$$

$$\left(1 - e^{\gamma_0}\right)^2 + \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}\left(1 - e^{\gamma_0}\right) = \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}\left(1 + e^{\gamma_0}\right)$$

$$\left(1 - e^{\gamma_0}\right)^2 = \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2}\cdot 2\, e^{\gamma_0} = \mathfrak{A}_0\,\mathfrak{R}_0\cdot e^{\gamma_0}$$

$$1 - e^{\gamma_0} = \sqrt{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}\cdot e^{\frac{\gamma_0}{2}} \tag{8}$$

Podijeliti ćemo ovu jednadžbu sa $e^{\frac{\gamma_0}{2}}$ pa ćemo dobiti:

$$e^{-\frac{\gamma_0}{2}} - e^{\frac{\gamma_0}{2}} = \sqrt{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0},$$

$$e^{\frac{\gamma_0}{2}} - e^{-\frac{\gamma_0}{2}} = -\sqrt{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}. \tag{9}$$

Dizanjem na kvadrat ove jednadžbe dobivamo:

$$e^{\gamma_0} - 2 + e^{-\gamma_0} = \mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0,$$

$$e^{\gamma_0} + e^{-\gamma_0} = 2 + \mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0,$$

$$\frac{e^{\gamma_0} + e^{-\gamma_0}}{2} = 1 + \frac{\mathfrak{A}_0\cdot\mathfrak{R}_0}{2} = \frac{e^{\beta_0 + j\alpha_0} + e^{-\beta_0 - j\alpha_0}}{2}$$

$$= \frac{e^{\beta_0}}{2}\left[\cos\alpha_0 + j\sin\alpha_0\right] + \frac{e^{-\beta_0}}{2}\left[\cos\left(-\alpha_0\right) + j\sin\left(-\alpha_0\right)\right]$$

$$= \frac{e^{\beta_0}}{2}\left(\cos\alpha_0 + j\sin\alpha_0\right) + \frac{e^{-\beta_0}}{2}\left(\cos\alpha_0 - j\sin\alpha_0\right)$$

$$= \frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2}\cdot\cos\alpha_0 + j\,\frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2}\cdot\sin\alpha_0 = X + jY, \tag{10}$$

$$X = \frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2}\cdot\cos\alpha_0, \tag{11}$$

$$Y = \frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2}\cdot\sin\alpha_0, \tag{12}$$

$$Y^2 = \frac{(e^{\beta_0} - e^{-\beta_0})^2}{4} \cdot \sin^2\alpha_0, \quad \frac{(e^{\beta_0} - e^{-\beta_0})^2}{4} = \frac{Y^2}{\sin^2\alpha_0}. \tag{13}$$

Postoje odnosi

$$(e^{\beta_0} + e^{-\beta_0})^2 = e^{2\beta_0} + 2 + e^{-2\beta_0}$$
$$(e^{\beta_0} - e^{-\beta_0})^2 = e^{2\beta_0} - 2 + e^{-2\beta_0}$$
$$(e^{\beta_0} + e^{-\beta_0})^2 - (e^{\beta_0} - e^{-\beta_0})^2 = 4$$
$$(e^{\beta_0} + e^{-\beta_0})^2 = (e^{\beta_0} - e^{-\beta_0})^2 + 4. \tag{14}$$

$$X^2 = \frac{(e^{\beta_0} + e^{-\beta_0})^2}{4} \cdot \cos^2\alpha_0 = \left[\frac{(e^{\beta_0} - e^{-\beta^0})^2}{4} + 1\right](1 - \sin^2\alpha_0)$$

$$= \left(\frac{Y^2}{\sin^2\alpha_0} + 1\right)(1 - \sin^2\alpha_0) = \frac{Y^2}{\sin^2\alpha_0} + 1 - Y^2 - \sin^2\alpha_0$$

Pomnožiti ćemo ovu jednadžbu sa $\sin^2\alpha_0$ pa ćemo dobiti:

$$X^2 \cdot \sin^2\alpha_0 = Y^2 + (1 - Y^2)\sin^2\alpha_0 - \sin^4\alpha_0$$
$$\sin^4\alpha_0 - (1 - X^2 - Y^2)\sin^2\alpha_0 = Y^2$$
$$\sin^2\alpha_0 = \frac{1 - X^2 - Y^2}{2} + \sqrt{\frac{(1 - X^2 - Y^2)^2}{4} + Y^2} \tag{15}$$

Na sličan način dobiva se:

$$\frac{(e^{\beta_0} - e^{-\beta_0})^2}{4} = -\frac{1 - X^2 - Y^2}{2} + \sqrt{\frac{(1 - X^2 - Y^2)^2}{4} + Y^2} \tag{16}$$

Podijeliti ćemo brojnik i nazivnik na desnoj strani jedn. 6 sa $e^{\frac{\gamma_0}{2}}$ pa ćemo dobiti:

$$\mathfrak{Z} = \frac{2}{\mathfrak{A}_0} \cdot \frac{e^{-\frac{\gamma_0}{2}} - e^{\frac{\gamma_0}{2}}}{e^{-\frac{\gamma_0}{2}} + e^{\frac{\gamma_0}{2}}} = -\frac{2}{\mathfrak{A}_0} \cdot \frac{e^{\frac{\gamma_0}{2}} - e^{-\frac{\gamma_0}{2}}}{e^{\frac{\gamma_0}{2}} + e^{-\frac{\gamma_0}{2}}} \tag{17}$$

Prema jednadžbi 14 imamo da je:

$$\left(e^{\frac{\gamma_0}{2}} + e^{-\frac{\gamma_0}{2}}\right)^2 = 4 + \left(e^{\frac{\gamma_0}{2}} - e^{-\frac{\gamma_0}{2}}\right)^2$$
$$e^{\frac{\gamma_0}{2}} + e^{-\frac{\gamma_0}{2}} = \sqrt{4 + \left(e^{\frac{\gamma_0}{2}} - e^{-\frac{\gamma_0}{2}}\right)^2}. \tag{18}$$

Prema tome možemo jedn. 17 napisati u obliku:

$$\mathfrak{Z} = -\frac{2}{\mathfrak{A}_0} \cdot \frac{e^{\frac{\gamma_0}{2}} - e^{-\frac{\gamma_0}{2}}}{\sqrt{4 + \left(e^{\frac{\gamma_0}{2}} - e^{-\frac{\gamma_0}{2}}\right)^2}} = -\frac{2}{\mathfrak{A}_0} \cdot \frac{-\sqrt{\mathfrak{A}_0 \cdot \mathfrak{R}_0}}{\sqrt{4 + \mathfrak{A}_0 \cdot \mathfrak{R}_0}}$$



$$= \sqrt{\frac{\mathfrak{R}_0}{\mathfrak{A}_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\mathfrak{A}_0 \cdot \mathfrak{R}_0}{4}}} \tag{19}$$

Jedan naročito jednostavan slučaj lančanog kruga je t. zv. krug sa ovojnicama čije otpore po duljini čine ovojnice (samoindukcija $L$) a paralelne otpore kondenzatori (kapacitet $C$). Olakšati ćemo sebi proučavanje ovakvoga kruga prve vrste (koji počinje i svršava se sa kapacitetom $\frac{C_0}{2}$ vezanim paralelno sl. 3) uzimajući da ovojnice i kondenzatori nemaju gubitaka. Tada je:

$$\mathfrak{R}_0 = j\omega L_0$$
$$\mathfrak{A}_0 = j\omega C_0$$

A iz jednadžbe 10 ćemo imati

$$X + jY = 1 - \frac{\omega^2 L_0 \cdot C_0}{2} \tag{20}$$

Odvojiti ćemo realni dio od imaginarnog pa ćemo dobiti:

$$X = \frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2} \cdot \cos\alpha_0 \text{ (jedn. 11)} = 1 - \frac{\omega^2 L_0 \cdot C_0}{2} = 1 - 2\eta^2, \tag{21}$$

$$Y = \frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2} \cdot \sin\alpha_0 \text{ (jedn. 12)} = 0. \tag{22}$$

Ovde je: $\eta^2 = \frac{\omega^2 L_0 \cdot C_0}{4}$,

$$\eta = \frac{\omega}{\frac{2}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}}} = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}, \tag{23}$$

ako za »frekvenciju rezonancije«

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

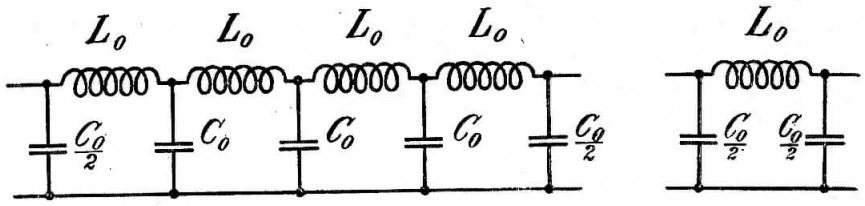
označimo sa:

$$\omega_0 = \frac{2}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot \frac{C_0}{4}}}, \quad f_0 = \frac{1}{\pi\sqrt{L_0 \cdot C_0}} \tag{24}$$

ako, prema jedn. za »frekvenciju rezonancije« označimo sa vlastitu frekvenciju lančanog člana, koji se sastoji iz samoindukcije $L_0$ i dva kondenzatora vezana u red sa kapacitetima po $\frac{C_0}{2}$ t. j. sa

ukupnim kapacitetom $\frac{C_0}{4}$ (sl. 3 desno). Ako je $f$ manje od vlastite frekvencije $f_0$ biti će $\eta^2 = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 < 1$, dakle $X = 1 - 2\eta^2$ imati će vrijednosti između + 1 i — 1. Prema tome mora biti vrijednost $X = \frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2} \cdot \cos\alpha_0 \leqq 1$.

Istodobno mora biti: $Y = \frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2} \cdot \sin\alpha_0$ jednako nuli, t. j. jedan od dva aktora jednak nuli. Obadva su uslova ispunjena ako je $\beta_0 = 0$. Pošto je, kao što je poznato $e^0 = 1$, biti će $\frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2} = \frac{1-1}{2} = 0$, dakle $Y = 0$, a $\frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2} = \frac{1+1}{2} = 1$, te $X = 1 \cdot \cos\alpha_0$ ne može biti nikad veće od 1, pošto se $\cos\alpha_0$ nalazi uvijek između vrijednosti + 1 i — 1. Dakle za vrijednost




Slika 3

manje od vlastite frekvencije vod sa ovojnicima, koje nemaju nikakvih gubitaka, neće imati nikakvog gušenja. Prema jednom trigonometrijskom pravilu može se napisati da je

$$X = 1 - 2\eta^2 = \cos\alpha_0 = 1 - 2\sin\frac{\alpha_0}{2}$$

ili

$$\sin\frac{\alpha_0}{2} = \eta = \frac{f}{f_0}, \qquad (25)$$

t. j. sinus polovine konstante duljine vala raste proporcionalno sa frekvencijom kad je $f$ manje od $f_0$ ako je $f = f_0$ biti će $\sin\frac{\alpha_0}{2} = 1$, $\frac{\alpha_0}{2} = 90^0$, $\alpha_0 = 180^0$. Pošto sinus promjenljivog kuta sve sporije raste što se kut više približava vrijednosti $90_0$ to će porastu vrijednosti $\sin\frac{\alpha_0}{2}$ koji je proporcionalan frekvenciji $\omega$, odgovarati sve



brži porast $\frac{\alpha_0}{2}$ t. j. $\alpha_0$ u koliko se frekvencija približava vlastitoj frekvenciji $\left(\frac{\alpha_0}{2} = 90^0\right)$. Dakle, konstantna duljina vala nije jednostavno proporcionalna frekvenciji, kao što je slučaj kod homogene linije sa jako povećanom samoindukcijom, već ona sve brže raste što se više upotrijebljena frekvencija približuje graničnoj frekvenciji. Fazna brzina $v = \frac{2\pi f}{\alpha_0}$ (između ovojnica u sek. prema jedn.

$$f\lambda = \frac{2\pi f}{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \text{ i } v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}.)$$

pada u koliko frekvencija raste. Vrijeme faznog pomaka visokofrekventnih titranja u krugu sa ovojnicama veće je nego kod titranja nižih frekvencija. Visokofrekventna harmonička titranja govornih struja zaostaju u fazi iza niskofrekventnih na kraju linije pa imamo pojav fazne diskusije.

Iznad vlastite frekvencije $f_0$ biti će $\eta^2 = \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 > 1$, dakle $X = 1 - 2\eta^2$ biti će niže od — 1. a njegova vrijednost > 1; t. j. $\frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2}$ biti će > 1 pošto vrijednost za $\cos\alpha_0$ ni u kom slučaju ne može prijeći vrijednost 1. To znači da su $\beta_0$ i $\frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2}$ veći od > 0. Pošto pak $Y$ mora ostati jednako 0 (jedn. 22) to mora biti $\sin\alpha_0 = 0$, t. j. $\alpha_0 = 0$ ili $180^0$ a $\cos\alpha_0 = \pm 1$. Pošto je niže od — 1, dakle u svakom slučaju negativno, to se ima staviti da je $\cos\alpha_0 = -1$, t. j. $\alpha_0 = 180^0$. Svaki član kruga sa samoinduktivnim ovojnicama koje nemaju gubitka, pomiče za $180^0$ faze titranja koja su iznad $f_0$, dakle ova se titranja potanko reflektiraju. Imati ćemo:

$$X = \frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2} \cdot (-1) = -\frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2} = 1 - 2\eta^2,$$

$$\frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2} = 2\eta^2 - 1. \qquad (26)$$

Pošto je

$$\left(e^{\frac{\beta_0}{2}} + e^{-\frac{\beta_0}{2}}\right)^2 = e^{\beta_0} + 2 + e^{-\beta_0},$$

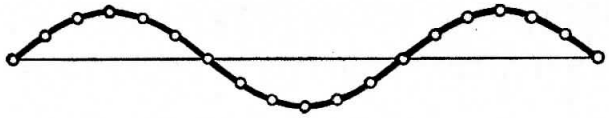
biti će:

$$\frac{e^{\beta_0} + e^{-\beta_0}}{2} = \frac{\left(e^{\frac{\beta_0}{2}} + e^{-\frac{\beta_0}{2}}\right)^2}{2} - 1 = 2\eta^2 - 1$$

$$\frac{\left(e^{\frac{\beta_0}{2}}+e^{\frac{-\beta_0}{2}}\right)^2}{4}=\eta^2,\quad \frac{e^{\frac{\beta_0}{2}}+e^{\frac{-\beta_0}{2}}}{2}=\eta=\frac{f}{f_0}. \tag{27}$$

T. j. konstanta gušenja $\beta^0$ za frekvencije veće od $f_0$ raste naglo i u krugu sa samoinduktivnim ovojnicama koje nemaju gubitka, i uslovljena je samo unutrašnjim refleksijama kruga. Pošto vlastita frekvencija $f_0$ članova lančanog kruga u isto vrijeme predstavlja onu granicu do koje titranja prolaze bez gušenja kroz krug sa samoinduktivnim ovojnicama koje nemaju gubitaka, a titranja sa većim frekvencijama bivaju snažno prigušena, to se $f_0$ naziva još i »granična frekvencija« kruga. Pošto je za graničnu frekvenciju $\alpha_0 = \pi$, znači da je polovina duljine vala granične frekvencije točno jednaka razmaku dvaju susjednih članova lančanog voda a sva titranja sa nižim frekvencijama imaju veće duljine vala.

Kad ovo znamo možemo očiglednije objasniti djelovanje kruga sa samoinduktivnim ovojnicama jednom usporedbom iz mehanike, naime usporedbom sa horizontalno nategnutom tankom žicom u

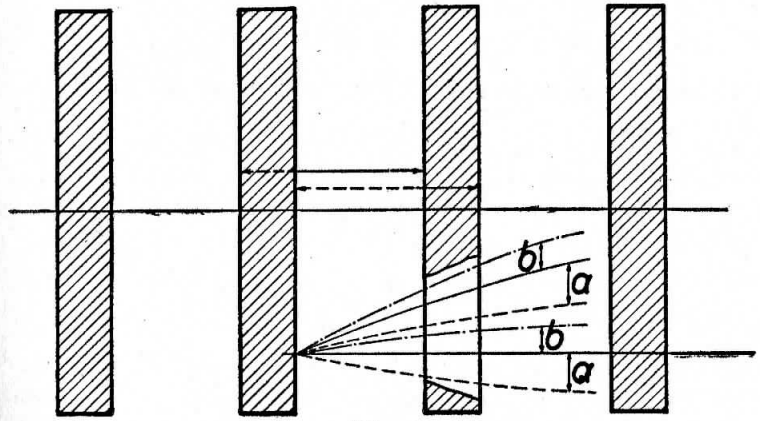


Slika 4

kojoj se na jednakim razmacima nalaze loptice čiji je zbroj masa znatno veći od mase same žice. Elastičnost žice odgovara kapacitetu linije a masa loptica odgovara samoindukciji ovojnica. Ako žicu dovedemo pomicanjem tamo-amo do titranja takve frekvencije, da na jednu duljinu vala dođe veći broj loptica, to će masa ovih loptica doprinijeti da se savlada zračni otpor, dakle pomagati će stvaranju titranja (sl. 4). Ako ukupnu masu loptica raspodijeljujemo na sve manji broj loptica a na sve većim razmacima, koji će napokon biti veći od polovine valne duljine titranja, koje hoćemo dati žici, vidjeti ćemo da će biti sve teže (i na kraju nemoguće) da proizvedemo ova titranja. Loptice će djelovati skoro kao beskonačno velike mase; gibanja koja dajemo žici reflektirati će se na lopticama, same loptice skoro se neće gibati, tako da se od njih neće prenositi skoro nikakvo gibanje na dio žice koji leži iza njih. Opterećenje koje loptice proizvode u žici gušiti će skoro potpuno, uslijed refleksije na lopticama, sva titranja čija je polovina duljine vala kraća od razmaka loptica.



Jednom isporedbom iz optike mogle bi se ove pojave još bolje objasniti. Zamislimo jednu svjetlonosnu zraku koja prolazi izmjenično kroz staklene ploče i zračne međuprostore (sl. 5). Poznato je, da na svakom mjestu prelaza između stakla i zraka samo jedan dio svijetlosnih valova ide dalje a dugi se reflektira. Val koji je reflektiran s lijeve površine treće staklene ploče (predstavljen u slici isprekidanom strijelicom) biva ponovno djelomično reflektiran. Dva put reflektirana zraka (izvučena strijelica) kreće se u istom pravcu kao i prvobitna zraka i ta se pojava ponavlja i dalje. Imati ćemo bezbroj refleksija i prema tome dvije grupe zraka, prva grupa ima pravac kao i prvobitna zraka a druga suprotan. Nas interesira




Slika 5

prva grupa, jer mi hoćemo da prenesemo svjetlosne valove, a kasnije električne valove s lijeva na desno. Važno je sad u kakvom odnosu stoje faze pojedinih reflektiranih valova međusobno i prema fazi prvobitnog vala. Ako u jednoj točki u jednom određenom momentu prvi val raste (u sl. 5 dolje val je predstavljen izvučenom krivuljom) a reflektirani val »a« pada (nacrtan isprekidanom linijom) to će se obadva vala poništiti ko su iste jakosti, a u svakom slučaju smanjiti. Ako i reflektirani val »b« raste (nacrtan sa točkom i crtom) to će se on sumirati sa prvim valom. Dakle refleksije mogu biti kako od štete tako i od koristi. Istu sliku imamo kod kruga sa samoinduktivnim ovojnicama: staklene ploče to su ovojnice, zračni međuprostori odgovaraju paralelno vezanim kondenzatorima. Na svakoj ovojnici vrše se refleksije i to u tom smislu, da se strujni valovi idući do granične frekvencije tako reflektiraju

da se uzajamno pomažu, a kad se prijede granična frekvencija onda se takoreći potpuno poništavaju.

Valni otpor kruga sa samoinduktivnim ovojnicama biti će prema jedn. 19. kad je $\mathfrak{R}_0 = j\omega L_0$ a $\mathfrak{A}_0 = j\omega C_0$:

$$\mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{j\omega L_0}{j\omega C_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\omega^2 L_0 \cdot C_0}{4}}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} \quad \text{(jedn. 23)}$$

$$= \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}. \qquad (28)$$

Za $f$ manje od granične frekvencije $f_0$ biti će korijen u nazivniku realan i padati će do vrijednosti 0 u koliko frekvencija $f$ bude rasla do $f_0$. Dakle isto tako i realan valni otpor raste od vrijednosti $\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ za niže frekvencije (što odgovara valnom otporu homogene linije bez gubitaka) do vrijednosti $\infty$ za graničnu frekvenciju. Iznad granične frekvencije korijen će biti imaginaran, pa njegovu vrijednost možemo metnuti jednaku $j\,m$ ($m$ raste kad frekvencija raste). Dobit ćemo:

$$\mathfrak{Z}_{f>f_0} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \cdot \frac{1}{jm} = -j \cdot \frac{1}{m}\sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \qquad (29)$$

t. j kapacitetni valni otpor koji pada kad frekvenciqja raste. Ako je frekvencija dovoljno visoka možemo zanemariti 1 u odnosu prema $\eta^2$ pa ćemo dobiti:

$$\mathfrak{Z}_{f\gg f_0} = \frac{1}{j\eta} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{2}{j\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0}} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \frac{2}{j\omega C_0} \qquad (30)$$

t. j. prividni otpor prvoga kondenzatora vezanog u red sa kapacitetom $\frac{C_0}{2}$ koji prima svu struju koja protječe kroz krug sa samoinduktivnim ovojnicama, dok kroz sam krug ne teče skoro nikakva struja.

Slika 6 pokazuje mijenjanje $\alpha_0$ $\beta_0$ i $\mathfrak{Z}$ jednoga kruga sa samoinduktivnim ovojnicama a u ovisnosti o frekvenciji.

Otpor $R_0$ koji ovojnice u stvari imadu, kao i odvod $A_0$ kondenzatora, neće bitno izmijeniti opisane odnose. Pretpostaviti ćemo za sad, da su ove obadvije veličine, nezavisne od frekvencije, linijske konstante. Biti će:

$$\mathfrak{R}_0 = R_0 + j\omega L_0$$
$$\mathfrak{A}_0 = A_0 + j\omega C_0$$



a prema jedn. 10 će biti

$$X + jY = 1 + \frac{(A_0 + j\omega C_0)\cdot(R_0 + j\omega L_0)}{2}$$

$$= 1 + \frac{A_0 \cdot R_0 + j\omega R_0 \cdot C_0 + j\omega A_0 \cdot L_0 - \omega^2 L_0 \cdot C_0}{2}$$

$$= 1 + \frac{A_0 \cdot R_0 - \omega^2 L_0 \cdot C_0}{2} + j\,\frac{\omega(R_0 \cdot C_0 + A_0 \cdot L_0)}{2} \qquad (31)$$

$$X = 1 + \frac{A_0 \cdot R_0 - \omega^2 L_0 \cdot C_0}{2}$$

$$= 1 - 2\eta^2 + \frac{A_0 \cdot R_0}{2} \text{ (jedn. 23)} \approx 1 - 2\eta^2, \qquad (32)$$

$$Y = \frac{\omega(R_0 \cdot C_0 + A_0 \cdot L_0)}{2}. \qquad (33)$$

Član $\frac{A_0 \cdot R_0}{2}$ može se u odnosu prema $(1-2\ \eta^2)$ zanemariti. Staviti ćemo nađene vrijednosti za $X$ i $Y$ u jedn. 15 i 16 i zanemariti ćemo još $Y^2$ u odnosu prema $(1-X^2)$ pošto su $R_0 \cdot C_0$ i $A_0 \cdot L_0$ prilično male vrijednosti. Naravno da ovo zanemarivanje nije dopušteno kad je $X$ približno jednako $\pm 1$, ili kad je po jedn. 32 $\eta = \frac{f}{f_0}$ približno jednako 0 ili 1 t. j. za vrlo niske frekvencije ili za frekvencije koje se nalaze blizo granične frekvencije. Nas interesiraju naročito frekvencije koje se nalaze između ova dva granična slučaja, za koje dobivamo iz jedn. 15:

$$\sin^2\alpha_0 \approx \frac{1-X^2}{1} + \sqrt{\frac{(1-X^2)^2}{4} + Y^2} = \frac{1-X^2}{2}\left[1 + \sqrt{1 + \frac{4\,Y^2}{(1-X^2)^2}}\right] \qquad (34)$$

Pošto je iz gore navedenoga razloga $\frac{4\,Y^2}{(1-X^2)^2} \ll$ i kako je za vrijednost X izraz $\sqrt{1+X} \approx 1 + \frac{X}{2}$ to možemo napisati:

$$\sqrt{1 + \frac{4\,Y^2}{(1-X^2)^2}} \approx 1 + \frac{2\,Y^2}{(1-X^2)^2}$$

pa ćemo dalje dobiti:

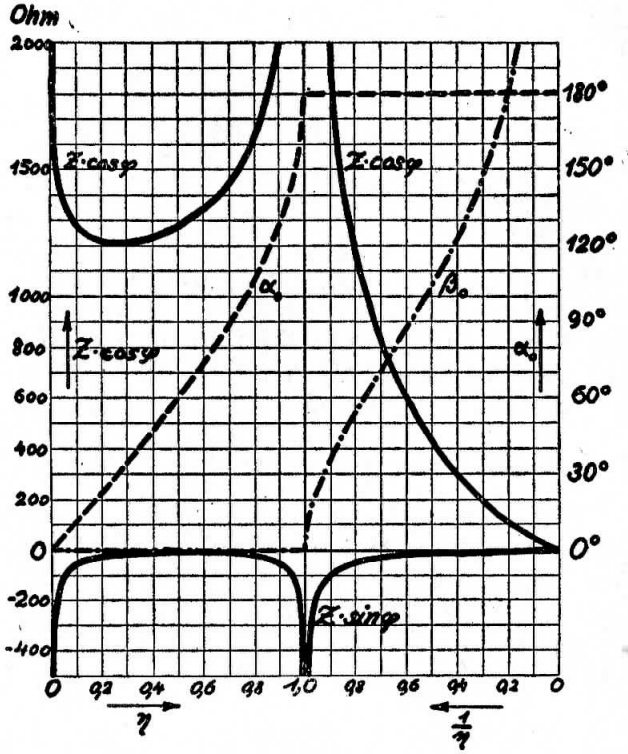
$$\sin^2\alpha_0 \approx \frac{1-X^2}{2}\left(2 + \frac{2\,Y^2}{(1-X^2)^2}\right) = (1-X^2)\left(1 + \frac{Y^2}{(1-X^2)^2}\right) \qquad (35)$$

Zanemariti ćemo napokon drugi član u zagradi pa ćemo dobiti:

$$\sin\alpha_0 \approx \sqrt{1 - X^2},\ \cos\alpha_0 \approx X \approx 1 - 2\eta^2 \text{ (jedn. 32)} \qquad (36)$$

Dobivamo dakle približno isti odnos kao iz krug sa samoinduktivnim ovojnicama koji nemaju gubitaka:

$$\sin\frac{\alpha_0}{2} \approx \eta = \frac{f}{f_0} \qquad (37)$$




Slika 6

Iz jednadžbe 16 dobiva se:

$$\frac{(e^{\beta_0} - e^{-\beta_0})^2}{4} \approx -\frac{1 - X^2}{2} + \sqrt{\frac{(1 - X^2)^2}{4} + Y^2} = -\frac{1 - X^2}{2}.$$

$$\left[1 - \sqrt{1 + \frac{4\,Y^2}{(1 - X^2)^2}}\right] \approx \frac{1 - X^2}{2}\left[1 - 1 - \frac{2\,Y^2}{(1 - X^2)^2}\right] = \frac{Y^2}{1 - X^2}$$

$$\frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2} \approx \frac{Y}{\sqrt{1 - X^2}} \approx \frac{\omega(R_0 \cdot C_0 + A_0 \cdot L_0)}{2\sqrt{1 - (1 - 2\eta^2)^2}} \text{ (jedn. 37 i 36)}$$



$$= \frac{\omega(R_0 \cdot C_0 + A_0 \cdot L_0)}{2\sqrt{1 - 1 + 4\eta^2 - 4\eta^4}} = \frac{\omega(R_0 \cdot C_0 + A_0 \cdot L_0)}{2 \cdot 2\eta\sqrt{1 - \eta^2}} = \frac{\omega(R_0 \cdot C_0 + A_0 \cdot L_0)}{2\omega\sqrt{L_0 \cdot C_0}\sqrt{1 - \eta^2}}$$

(jedn. 23)

$$= \left(\frac{R_0}{2}\sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{A_0}{2}\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \eta^2}}. \qquad (38)$$

Kad je $\beta_0 \ll 1$, biti će $e^{\beta^0} \approx (1 + \beta_0)$ i $e^{-\beta_0} \approx (1 - \beta_0)$ dakle je također:

$$\frac{e^{\beta_0} - e^{-\beta_0}}{2} \approx \beta_0 \approx \left(\frac{R_0}{2}\sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{A_0}{2}\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \eta^2}} \qquad (39)$$

Očevidna je sličnost ove jednadžbe sa jedn. koja vrijedi za homogenu liniju sa jako povećanom samoindukcijom. Kad je $\eta^2 \ll 1$ obadvije linije pokazuju praktično isto gušenje; u koliko se više približavamo graničnoj frekvenciji gušenje linije sa samoinduktivnim ovojnicima raste sve više (za vrlo niske frekvencije i za frekvencije, koje su sasvim blizo graničnoj frekvenciji $f_0$ ne vrijedi više, kao što je spomenuto, izvedena formula gušenja).

Slična razmatranja za frekvencije iznad granične frekvencije $f_0$ pokazuju, da se $\alpha_0$ sve više približuje vrijednosti 180° u koliko frekvencija raste, dok vrijednost izraza $\frac{e^{\frac{\beta^0}{2}} + e^{\frac{-\beta_0}{2}}}{2}$ postaje približno jednaka vrijednosti $\eta = \frac{f}{f_0}$ (jedn. 27) koja vrijedi za liniju sa samoinduktivnim ovojnicama bez gubitka.

Valni otpor linije sa samoinduktivnim ovojnicama biti će prema jedn. 19:

$$\mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{A_0 + j\omega C_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (A_0 + j\omega C_0)}{4}}} \qquad (40)$$

Ako ne uzmemo u obzir vrlo niske frekvencije, možemo uvijek zanemariti $R_0$ u odnosu prema $j\omega L_0$ i $A_0$ u odnosu prema $j\omega C_0$ te dobiti približno formulu 28 koja je izvedena za krug sa samoinduktivnim ovojnicama koje nemaju gubitaka. Valni otpor ne prelazi jednu određenu konačnu vrijednost ni u slučaju granične frekvencije što se drugačije nije moglo ni očekivati s obzirom na slična razmatranja o strujno-rezonancijskom krugu koji ima otpore i odvode. $R_0$ i $A_0$ izazivaju u blizini granične frekvencije pojav jače kapacitetne komponente, koja dostiže svoju najveću vrijednost

kod $f_0$. Faktična linija sa samoinduktivnim ovojnicama ponaša se dakle u svakom pogledu približno kao i kad nema gubitaka.

Na ovaj smo način već opisali bitne osobine pupiniziranog kruga jer ovaj u principu nije ništa drugo nego krug sa samoinduktivnim ovojnicama. Ovojnice vezane duž linije to su Pupinove ovojnice sa samoindukcijom $L_0$ i stvarnim (efektivnim) otporom $R_0$, paralelno vezani kondenzatori to su dijelovi kabela, koji leže između dvije ovojnice sa kapacitetom $C_0 = C \cdot s$ i odvodom za izmjeničnu struju $A_0 = A \cdot s$, ako $C$ i $A$ znače odgovarajuće vrijednosti na kilometar kabela a s razmak između ovojnica u km. Jedina znatnija razlika je u tome što dijelovi kabela imaju još i otpor $R'_0 = R \cdot s$. Za sada nećemo voditi računa o posljedicama ove razlike, nego ćemo otporu ovojnice $R_0$ dodati otpor kabela $R'_0$, $R'_0$, na dijelu između dvije ovojnice. Isto tako možemo neznatnu samoindukciju $L'_0 = L \cdot s$ dijela kabela između ovojnica dodati samoindukciji $L_0$, i obrnuto neznatan uzajamni kapacitet $C'_0$ između namotaja ovojnice (odjeljak 5) dodati kapacitetu $C_0$ kabela između ovojnica, — S ovim pretpostavkama možemo u sažetom obliku reći o pupiniziranom krugu slijedeće:

Pupinizirani krug ima graničnu frekvenciju $f_0 = \frac{1}{\pi \sqrt{L_0 \cdot C_0}}$ (jedn. 24) koja je određena samoindukcijom Pupinovih ovojnica i kapacitetom dijela kabela između ovojnica; sva harmonična titranja govornih struja, koje prolaze kroz pupinizarani krug, čija je frekvencija iznad granične frekvencije $f_0$ vrlo su jako prigušena. Za gušenje titranja koja su ispod granične frekvencije (uzimajući sasvim niske frekvencije vrijedi slijedeće: Konstanta gušenja pupiniziranog kruga (za svaki razmak ovojnica) raste počam od vrijednosti

$$\beta_0 = \frac{R_0}{2}\sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{A_0}{2}\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

koja vrijedi za niske frekvencije i odgovara konstanti gušenja homogene linije sa povećanom samoindukcijom. Ona raste otprilike u razmeri $\frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}}$ sve do jedne vrijednosti koja već za graničnu frekvenciju pupiniziranog kruga potpuno spriječava prolaz struje. (Pošto je $\beta_0$ kod Pupinovog kruga uvijek $\ll 1$ opravdan je pojednostavnjeni odnos $\frac{e^{\frac{\beta_0}{2}} - e^{-\frac{\beta_0}{2}}}{2} \approx \beta_0$; $\eta = \frac{f}{f_0}$ znači odnos razmatrane i granične frekvencije; $R_0$ i $A_0$ smatramo privremeno kao linijske konstante nezavisne od frekvencije).



Konstanta duljine vala $\alpha_0$ (za jedan razmak između ovojnica) za titranja čija je frekvencija ispod $f_0$ (izuzevši sasvim niske frekvencije) mijenja se po jedn. 37: $\sin\frac{\alpha_0}{2} \approx \eta = \frac{f}{f_0}$ Ova je konstanta predstavljena u sl. 6 isprekidanom krivuljom označenom sa $\alpha_0$. Uslijed ovakvog mijenjanja $\alpha_0$ nastaje fazna distorzija, kao što je to detaljnije izloženo prilikom proučavanja kruga sa samoinduktivnim ovojnicama koje nemaju gubitaka. — Sva harmonična titranja čija je frekvencija iznad granične frekvencije pupinizirane linije, skoro se potpuno reflektiraju na ovojnicama ($\alpha_0 = 180^0$) čime se objašnjava izvanredno jako gušenje pupinizirane linije u ovoj oblasti frekvencija.

Valni otpor pupinizirane linije raste približno u odnosu $\frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}}$ počinjući od vrijednosti $\mathfrak{Z} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ koja vrijedi za niže frekvencije (izuzimajući sasvim niske) i koja sasvim odgovara valnom otporu homogene linije sa jako povećanom samoindukcijom. Ovo rastenje vrijednosti valnog otpora ide do maksimalne vrijednosti za slučaj granične frekvencije potom opet opada. Valni otpor ima sasvim blizo do granične frekvencije realan karakter, a za veće frekvencije postaje više kapacitivan.

Iz ovih razmatranja možemo izvesti slijedeće zaključke:

Granična frekvencija $f_0$ mora se nalaziti iznad važnih govornih frekvencija, koje treba prenositi. Granična frekvencija mora se, što više, dosta daleko pomaknuti nad najnižu granicu od 2000 Herca, koja je navedena u odjeljku 1. O tome će se dati detaljni razlozi u odjeljku 9. Danas se uzima kao granična frekvencija normalno pupinizirane linije 2750 Herca, a za daljinsku telefoniju preko 1000 km. 5350 Herca (odjeljak 10). Ako se poveća gornja granica frekvencija koje treba prenijeti, kao što je to spomenuto u odjeljku 1, moraju se i granične frekvencije povećati (na 3400—3500 Herca za normalne daljine i 7700 Herca za velike daljine). Uslov da granična frekvencija bude iznad važnih govornih frekvencija istovjetan je sa Pupinovim uslovom, da razmaci između ovojnica moraju biti mali u odnosu prema valnoj duljini titranja koja se imaju prenijeti, tako da na jednu valnu duljinu dođe veći broj ovojnica. Ovaj smo uslov već raspravljali prilikom opisivanja kruga sa samoinduktnivnim ovojnicama.

Čisto je ekonomsko pitanje, kakvom se varijacijom kapaciteta $C$ kabla, samoindukcije $L_0$ ovojnice i duljine s razmaka među ovojnicama može postići željena granična frekvencija.

$$f_0 \approx \frac{1}{\pi\sqrt{L_0 \cdot C_0}} = \frac{1}{\pi\sqrt{L_0 \cdot C_0 \cdot s}} = \frac{1}{\pi s\sqrt{\frac{L_0}{s} \cdot C}} \qquad (41)$$

Kapacitet se kreće u prilično uskim granicama kod konstrukcije kablovskih žila koja je danas uobičajena i to od 0,03 do 0,04 μF/km. Ostaje dakle da se bira između skupljeg riješenja t. j. visoke samoindukcije ovojnica sa malim udaljenostima (veliki broj ovojnica) i jeftinijeg riješenja (mala samoindukcija sa većim razmakom ovojnica). Protiv ovog jeftinijeg riješenja govori formula gušenja u jedn. 39, po kojoj je potrebna visoka samoindukcija ovojnica i mala njihova udaljenost pa da bi pupiniziranje bilo efektivno. Jer inače bismo morali povećati debljinu žica u kabelu da postignemo određenu konstantu gušenja, t. j. morali bismo upotrijebiti više bakra i olova za kabel, tako da bi pojeftinjavanje Pupinovih ovojnica bilo poništeno povećanjem troškova za kabel. Ekonomski optimum može se u danom slučaju postići samo uzimanjem u obzir svih faktora cijene. Treba se samo sjetiti, kako su velike promjene tržnih cijena bakra i olova, koje imaju odlučan utjecaj na cijenu kabela. Na cijenu ovojnica i montažu u prvoj liniji, pa i za sam kabel imaju utjecaja i radničke nadnice. Ipak su u toku godina u cilju normaliziranja stvorena dva standardsistema: njemački sa razmakom ovojnica 2 km i amerikanski sa s = 1.83 km. Postoji jedan novi njemački prijedlog sa s = 1·7 km i većom graničnom frekvencijom (bliže o tome u odjeljku 5).

Za srednju govornu frekvenciju od 800 Herca, koja leži daleko niže od granične frekvencije, iznosi duljina vala i za Pupinov kabel oko 20 km, a to je vrijednost koja je nađena za homogeni kabel bez gubitaka i sa jako povećanom samoindukcijom. Dakle na jednu duljinu vala glavne govorne frekvencije dođe 10 do 12 ovojnica.

Odvojiti ćemo sad u jedn. 39 dijelove koji se odnose na ovojnice (indeks 0) od dijelova koji se odnose na kabel između ovojnica (vrijednost na km · s)

$$\beta_0 \approx \left(\frac{R \cdot s + R_0}{2}\sqrt{\frac{C \cdot s + C_0}{L \cdot s + L_0}} + \frac{A \cdot s}{2}\sqrt{\frac{L \cdot s + L_0}{C \cdot s + C_0}}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} \qquad (42)$$



$$f_0 = \frac{1}{\pi\sqrt{(L \cdot s + L_0) \cdot (C \cdot s + C_0)}} = \frac{1}{\pi s\sqrt{\left(L + \frac{L_0}{s}\right) \cdot \left(C + \frac{C_0}{s}\right)}} \qquad (43)$$

$$\beta \approx \sqrt{\frac{L \cdot s + L_0}{C \cdot s + C_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} = \sqrt{\frac{L + \frac{L_0}{s}}{C + \frac{C_0}{s}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} \qquad (44)$$

Profesor Pleijel (Stockholm) uzeo je u obzir okolnost, da je otpor kabela između ovojnica $R \cdot s$ ravnomjerno razdijeljen po cijeloj duljini (a mi smo gore pretpostavili da je taj otpor sadržan u otporu ovojnice), a Dr. Meyer, iz firme Siemens i Halske, uzeo je opet u obzir naročite okolnosti za niže frekvencije. Na osnovi njihovih rezultata, dolazi se do slijedećih izmjena formula za gušenje i prividni otpor, koje potpuno odgovaraju faktičnim prilikama:

$$\beta_0' = \left[\frac{R \cdot s\left(1 - \frac{2}{3}\eta^2\right) + R_0}{2}\sqrt{\frac{C \cdot s + C_0}{L \cdot s + L_0}} + \frac{A \cdot s}{2}\sqrt{\frac{L \cdot s + L_0}{C \cdot s + C_0}}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}}$$

$$\beta_0 = \beta_0' \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_0'}{\eta}\right)^2}}} \qquad (45)$$

Za gušenje na km Pupinove linije dobiva se na sličan način

$$\beta' = \left[\frac{R\left(1 - \frac{2}{3}\eta^2\right) + \frac{R_0}{s}}{2}\sqrt{\frac{C + \frac{C_0}{s}}{L + \frac{L_0}{s}}} + \frac{A}{2}\sqrt{\frac{L + \frac{L_0}{s}}{C + \frac{C_0}{s}}}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}}$$

$$\beta = \beta' \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\beta' \cdot s}{\eta}\right)^2}}} \qquad (46)$$

Realna konponenta prividnog otpora iznosi:

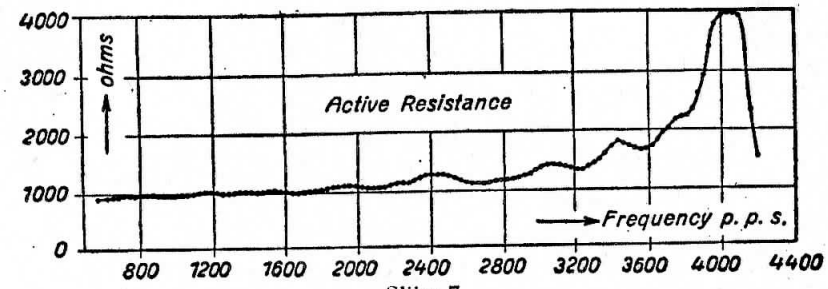
$$Z_r = \sqrt{\frac{L \cdot s + L_0}{C \cdot s + C_0}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\beta_0'}{\eta}\right)^2}}{2}}$$

$$= \sqrt{\frac{L + \frac{L_0}{s}}{C + \frac{C_0}{s}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\eta^2}} \sqrt{\frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{\beta' \cdot s}{\eta}\right)^2}}{2}} \qquad (47)$$

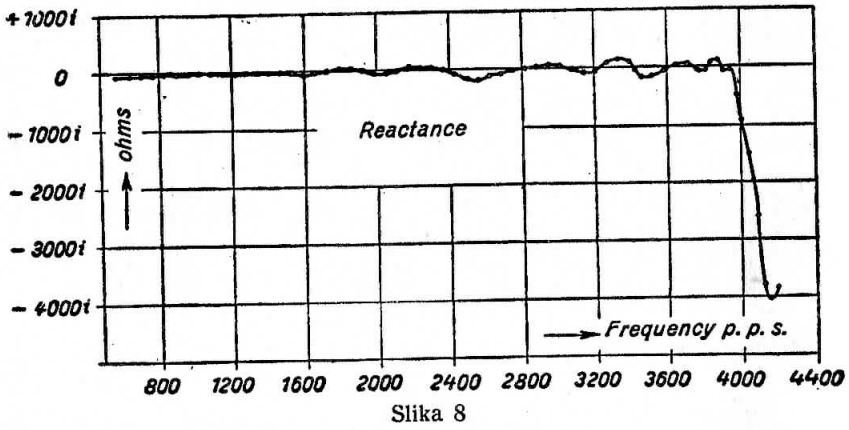
Imaginarna konponenta:

$$Z_i = -\frac{\beta_0}{2}\sqrt{\frac{L\cdot s + L_0}{C\cdot s + C_0}}\cdot\frac{1}{\eta(1-\eta^2)} = -\frac{\beta\cdot s}{2}\sqrt{\frac{L+\frac{L_0}{s}}{C+\frac{C_0}{s}}}\cdot\frac{1}{\eta(1-\eta^2)} \quad (48)$$

Matematičko izvođenje gornjih rezultata izlazi izvan okvira ove knjige.



Slika 7



Slika 8

Ne treba zaboraviti, da su stvarni otpor $R_0$ ovojnice i odvod kabela $A$ zavisni od frekvencije.

Kod mjerenja valnog otpora na položenim pupiniziranim kablovima pokazuje se, da se valni otpor u zavisnosti od frekvencije ne poklapa sa idealnom krivuljom (prema izvučenoj liniji u sl. 6), već da ima većih ili manjih odstupanja (sl. 7 i 8). Ove razlike uslovljene su time, što sve ovojnice nemaju sasvim istu samoindukciju i što sve sekcije kabela nemaju isti kapacitet. Nejednakosti

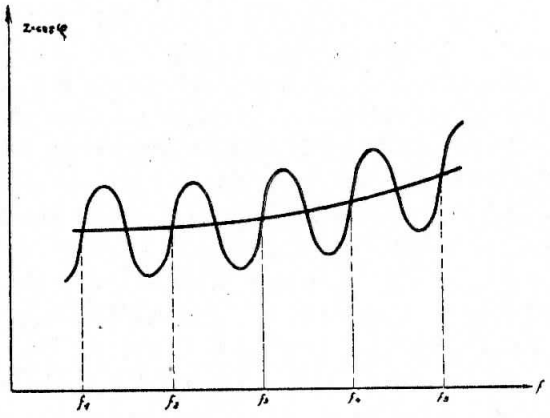


otpora ovojnica kablovskih sekcija ne igraju nikakvu ulogu, što je razumljivo kad se sjetimo da valni otpor pupinizirane linije prema jedn. 47/48 zavisi samo od veličina samoindukcije i kapaciteta. Pretpostavimo da sve ovojnice i sve sekcije kabela imaju potpuno jednake međusobne vrijednosti, i da samo samoindukcija jedne ovojnice odstupa od normalne vrijednosti. Tada će se na ovoj ovojnici pojaviti refleksije i reflektirane struje će se vraćati u liniju. Prema fazi titranja, koje će ove reflektirane struje (u ovisnosti od frekvencije) imati na početku linije, one će se zbrajati ili oduzimati sa direktnom strujom i prema tome će se prividno ili povećavati ili smanjivati. Prvom slučaju odgovarati će smanjenje prividnog otpora linije za dane frekvencije, a drugom slučaju povećanje. Na ovaj ćemo pojav naići na ma kojem mjestu kabela ispred ovojnice gdje se vrši refleksija; možemo dakle govoriti o promjenama valnog otpora. Naravno da će na drugom mjestu kabela biti drugi fazni odnosi reflektiranih i direktnih titranja, pa će prema tome, biti i druge promjene valnog otpora. Teorija i mjerenje pokazuju da promjene valnog otpora izazvane sa jednog jedinog mjesta kvara u ovisnosti, o frekvenciji imaju sasvim pravilan tok. Iz udaljenosti susjednih točaka koje imaju istu fazu kao što su na pr. prolazi u istom smislu kroz idealnu srednju krivu liniju može se, dapače stvoriti zaključak o daljini mjesta smetnje od točke mjerenja. Ako na pr. $m$-ta ovojnica, računajući od točke mjerenja, nema samoindukcije uslijed pogriješnog spajanja ili kratkog spoja u namotajima, onda se prema teoretskom računanju Küpfmüllera može na slijedeći način naći mjesto smetnje: Odrede se frekvencije za koje krivulja stvarnog valnog otpora siječe idealnu krivulju u pravcu odozdo prema gore ($f_1$, $f_2$, $f_3$ itd. u sl. 9); njima će odgovarati vrijednosti $\eta_1 = \frac{f_1}{f_0}$, $\eta_2 = \frac{f_2}{f_0}$, $\eta_3 = \frac{f_3}{f_0}$ td. Izračunati ćemo kuteve $\alpha_1$, $\alpha_2$, $\alpha_3$ itd., čiji su sinusi $\eta_1$ odn. $\eta_2$ odn. $\eta_3$ itd. Onda je $m \sim \frac{\pi}{\Delta\alpha}$ gdje $\Delta\alpha$ znači razliku dvaju izastopnih kuteva $(\alpha_2 - \alpha_1)$, ili $(\alpha_3 - \alpha_2)$.

Slične promjene krivulje prividnog otpora dobivaju se i kad je linija sastavljena iz dva dijela koji imaju različne valne otpore. Ove se promjene mogu otkloniti pomoću translatora koji je prilagođen na obje strane za jedan određeni pojas frekvencija. U koliko je mjesto nastavka dalje od točke mjerenja, u toliko će slabije biti amplitude promjenjivosti krivulje prividnog otpora. Stru-

ja mjerenja teče linijom od točke mjerenja do nastavka, a dio koji se reflektira na nastavku teče još jedanput na istoj dužini, ali u suprotnom pravcu. Jasno je, da promjene krivulje prividnog otpora padaju u koliko je daljina nastavka veća i to u razmjeru $e^{-2b}$ gdje $b$ znači gušenje između točke mjerenja i nastavka.

Ako imamo telefonske linije snabdjevene amplifikatorima, pa se želi da se dvije linije spoje prilagođenim translatorima na jedan širi pojas frekvencija, moraju se ispred translatora uključiti zgodno proračunane mreže koje se sastoje iz otpora, samoindukcija i



Slika 9

kapaciteta, uslijed kojih će se krivulja prividnih otpora dviju spojenih linija tako promijeniti, da će pokazivati isti tok frekvencija imajući u vidu njihov odnos prenosa preko translatora.

Stvarna pupinizirana linija nema samo jedno jedino mjesto refleksije. U opće ni jedna ovojnica nema istu samoindukciju kao one druge, nit i jedna kablovska sekcija nema isti kapacitet kao ostale. Prema tome kod svake se ovojnice javljaju nepravilne reflekcije koje kvare teoretsko prostiranje valova. Slučajno slaganje refleksionih pojava, koje su gore opisane samo za slučaj jednoga mjesta reflaksije, prouzrokuje stvarne promjene valnog otpora u ovisnosti o frekvenciji sa sasvim nepravilnim oscilijacijama oko srednje krivulje. Samo kad među bezbrojnim malim odstupanjima kod ovojnica postoji još neka gruba pogriješka, onda će pravilne promjene krivulje valnog otpora, koje ona proizvodi, nadmašiti male nepravilnosti krivulje koje potječu od neznatnih razlika među ovojnicama pa će se na osnovu ovih velikih promjena moći zaključiti, da postoji na pr. jedna ovojnica čija se samoindukcija jako



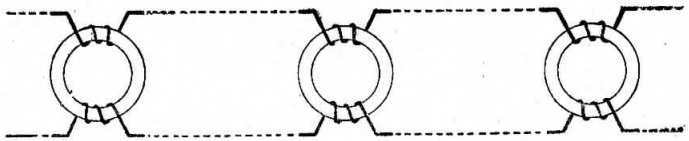
razlikuje od ostalih. U danom slučaju može se odrediti i mjesto gdje se smetnja nalazi.

Promjenljivost valnog otpora mora se kretati u malim granicama, čim se u pupiniziranu liniju hoće uključiti amplifikator za duplu liniju (odjeljak 9). Kod modernih kablovskih mreža mora se radi toga naročito paziti na »longitudinalnu simetriju« u pogledu samoindukcije ovojnica i kapaciteta kablovskih sekcija. Ovojnice se mogu bez teškoće tako namotavati, da samoindukcija odstupa svega za ± 1.5% od propisane vrijednosti, dok je trebalo dugo vremena, da se mogu kablovi fabricirati sa dovoljno ravnomjernim kapacitetom. Do sad se uspjelo toliko, da razlike u kapacitetu kablovskih sekcija budu najviše do 6%. Važno je, da ovojnice ne mijenjaju u većoj mjeri kod rada svoju samoindukciju uslijed slučajnih magnetiziranja. U slijedećem odjeljku govoriti ćemo detaljnije o mjerama koje se u tom pogledu moraju preduzeti.

## 3. PUPINOVE OVOJNICE

Pupinova ovojnica u principu nije ništa drugo nego kombinacija dviju ovojnica koji se umeću na jednakim razmacima u obadva voda strujnog kruga, a imaju jednu zajedničku određenu samoindukcija (sl. 10). S razloga koji će se navesti u ovom i u 6 odjeljku ne može se ukupna samoindukcija metnuti samo u jedan vod, naprotiv, mora se namotaj ovojnice što je moguće simetričnije raspodijeliti na oba voda. — Otpor ovojnice dodaje se otporu voda u kabelu koji treba pupinizirati pa se zbog toga mora gledati da otpor ovojnice bude što manji. Mora se nastojati da se dobije željena samoindukcija Pupinovih ovojnica sa što je moguće manjim brojem navojaka. Poznato je da prstenasta ovojnica u ovom pogledu (i u pogledu raspačavanja) predstavlja najpovoljniji oblik i da jezgra od feromagnetnog materijala izvanredno povećava samoindukciju jedne ovojnice danih geometrijskih dimenzija. Stavljanjem obadva namotaja na jednu jezgru postiže se da svaka polovina namotaja treba imati samo četvrtinu samoindukcije koja se traži za cijelu ovojnicu. Za ovo se na svaki način pretpostavlja da su obadva namotaja tako vezana u liniji, da struja, protječući kroz namotaje, uvijek u istom smijeru kruži oko jezore. Kad tako ne bi bilo, onda bi se dva magnetna polja proizvedena u jezgri uništavala, i Pupinova ovojnica predstavljala bi samo otpor bez samoindukcije.

Prve prstenaste jezgre za Pupinove ovojnice bile su sastavljene od prstenastih limova debljine 0,03 mm. načinjenih od legure željeza i silicija. Da bi se smanjili gubitci uslijed vrtložnih struja počele su se uskoro graditi jezgre od čelične žice, slabo legirane sa silicijem, debljine 0,1 mm. Ovakve su jezgre potpuno zadovoljavale više godina, dok se nisu na sve strane počele graditi mreže sa visokim naponom i elektrificirati glavne željezničke pruge. Ovo je bio uzrok da su se u paralelno vođenim telefonskim linijama javljale slučajne i snažne indukcione struje (v. odjeljak 7). Dovoljan je bio jedan strujni udar od 2 Amp. u namotajima ovojnica sa jezgrom od žice, da se samoindukcija ovojnice manji za okruglo 17%. U tom slučaju bilo bi gušenje odnosnog dijela linije prema jedn. 46 povećano za skoro 8%, kraj ostalih smetnja, pošto bi pojedine ovojnice nejednako reagirale na magnetizirajuću struju, t. j. jer bi se poslije magnetiziranja javljale razlike u vrijednostima



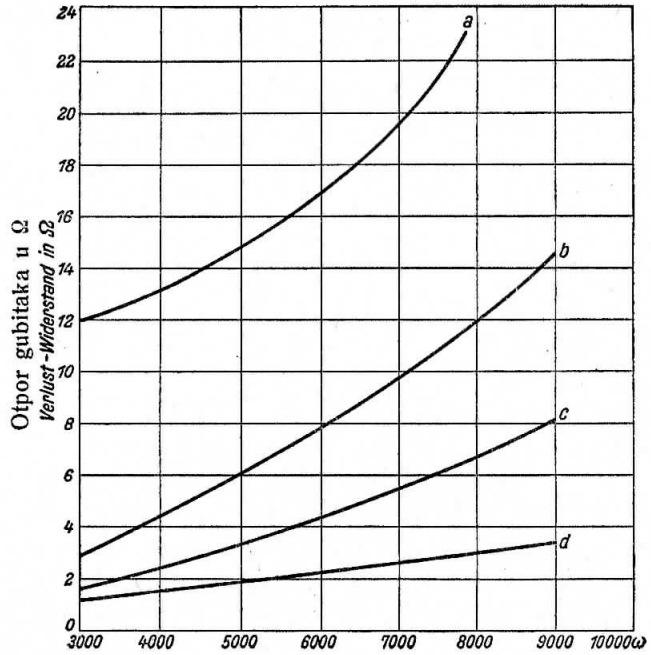
Slika 10

samoindukcije pojedinih ovojnica (odjeljak 3 i 9). To je bio glavni razlog zbog kojega su svjetske firme prešle na izgradnju magnetski stabilnije jezgre od fino samljevenog praha mekog željeza, čije je svako zrnce po mogućnosti potpuno opkoljeno vrlo tankim slojem izolacije. Ovako sitna razdioba materijala jezgre prouzrokuje još veće smanjivanje gubitaka uslijed vrtložnih struja. Osim toga čisti željezni materijal koji se obično upotrebljava, ima manje histerezijske gubitke nego ranije upotrebljavana jezgra od žice. Ovo smanjenje efektivnih otpora, koji inače rastu sa frekvencijom, čini da su na cijeloj duljini kabela manje distorzije amplituda. Da bi s druge strane bili što manji nemagnetski međuprostori, te da se ne bi permeabilitet jezgre previše smanjio, one se prave pod izvanredno visokim pritiskom (oko 10.000 kg/cm²). Na ovaj se način dobiva ciklični permeabilitet od 20 do 40 elektromagnetskih jedinica. Potreban je još čitav niz daljih procesa kod fabrikacije jezgre da se mješavini željeznog praha daju sve potrebne osobine i da se od njega dobije gotova jezgra. Jedan naročiti proces učvršćivanja daje jezgri otpornost na savijanje od okruglo 2 kg/mm² a jednim opet specijalnim procesom daje joj se magnetska stabilnost.



Njemačka pošta propisuje za ovojnice sa ovom jezgrom, da samoindukcija može pasti najviše za 2% kad kroz jednu polovinu namotaja prođe magnetizirajuća struja od 2 Amp.

Ciklički permeabilitet, koji se odnosi na izmjenične struje male jakosti, više se smanjuje za v r i j e m e jednog takvog magnetiziranja sa superponiranom istomjernom strujom, nego p o s l i j e magnetiziranja istosmjernom strujom. Radi boljeg iskorišćenja linija u kabelu, sve se više upotrebljava simultana telegra-



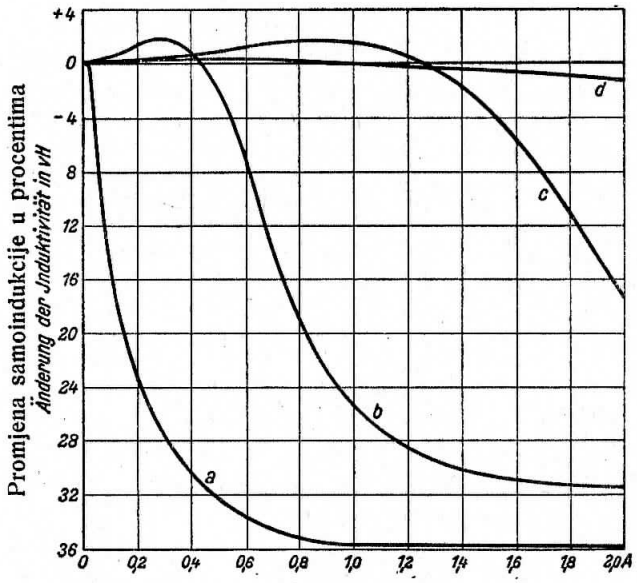

Slika 11

fija čije su istosmjerne struje »infrapozirane« telefonskim strujama. Za vrijeme dok prolazi jedan telegrafski strujni impuls pada samoindukcija Pupinove ovojnice, a istodobno raste otpor histerezije. Obadvije ove pojave proizvode povećanje gušenja za govorne frekvencije kod čega glavni utjecaj imaju promjene otpora histerezije. Gušenje govornih struja varira dakle u taktu telegrafskih znakova.

Jakost govornih struja za svaki glas ima najrazličnije momentane vrijednosti. Prema tome će ovojnice biti različno magnetizirane uslijed govorne struje kod prenosa jednoga glasa, a na odgovarajući način mijenjati će se i otpor histerezije. Omov zakon vri-

jedi samo za vrlo male intervale vremena, za vrijeme kojih se ne mijenja znatno jakost struje, a ne vrijedi za vrijeme jednog potpunog titranja.

Napon i jakost struje nisu više za vrijeme jednog titranja uzajamno proporcionalni; oblik krivulje prenesenih titranja govora izmijenjen je pa se javljaju nova harmonična titranja. Naravno, da su ove promjene beznačajne u odnosu prema malo prije opisanoj promenljivosti gušenja. No ipak je ova pojava bila osjetljiva kod izvanredno dugih pupiniziranih linija (5500 km.) koje su, u cilju proba, bile kombinirane. Distorziju prenesenoga govora, koja na-



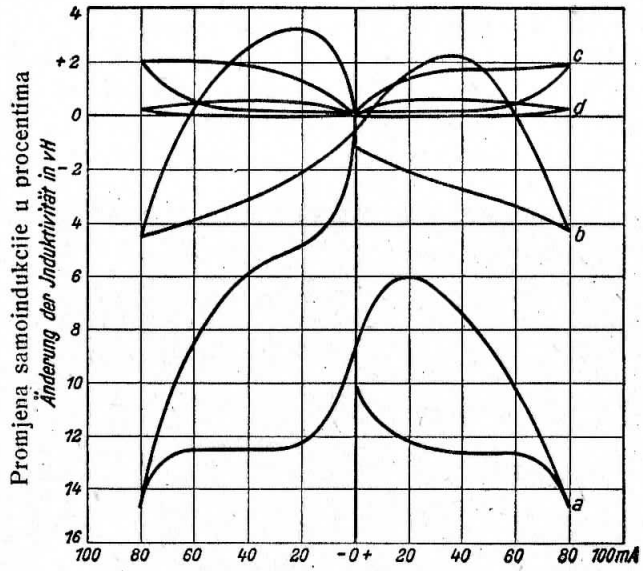
Slika 12

staje uslijed ove pojave, nazivamo »nelinearnom distorzijom« ili »distorzijom treće vrste«.

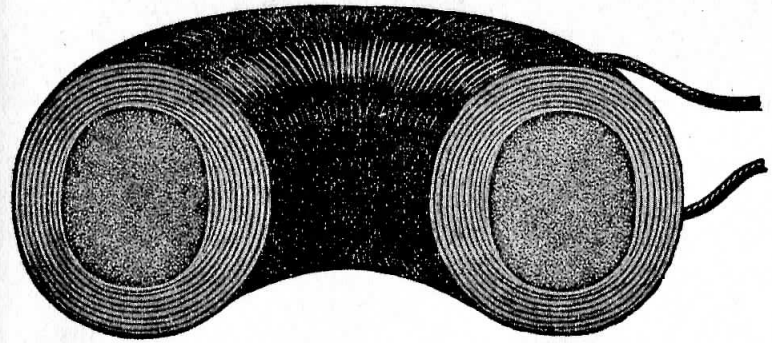
Mjerilo za nelinearne distorzije, koje nastaju uslijed pojave novih titranja i koje se uhom opažaju kao zvrčanje, jeste »faktor zvrčanja« (»Klirrfaktor«) ili faktor nelinearne distorzije t. j. odnos jakosti efektivne vrijednosti ovih novih titranja prema efektivnoj vrijednosti govornih titranja koja se šalju u liniju. Ovaj se odnos može bez teškoća odrediti kod slanja izmjenične struje sinusnog oblika i određene frekvencije. Prirodni logaritam ovoga odnosa predstavlja »gušenje zvrčanja«, odn. gušenje nelinearne distorzije.



Ova se pojava može otkloniti ako se kod pupiniziranja vrlo dugih linija uzme magnetni materijal za ovojnice sa naročito malim faktorom histerezije.



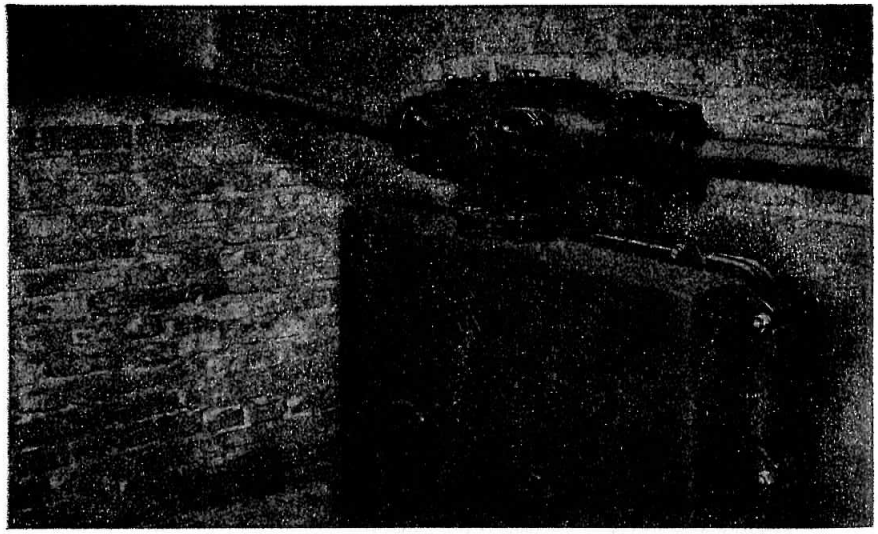
Slika 13


Slika 14

Slika 11 predstavlja ovisnost otpora gubitaka različnih Pupinovih ovojnica o frekvenciji, slika 12 pokazuje promjenu njihovih samoindukcija poslije prethodnog magnetiziranja istosmjernom strujom a slika 13 isto to samo za vrijeme superponiranog magnetiziranja istosmjernom strujom. Krivulje α odnose se na ovojnice sa jezgrom od lima, *b* i *c* na ovojnice sa jezgrom od žice a *d* na moderne zrnate jezgre.

Naročita korist prešane zrnate jezgre jeste ta, da se jezgri može dati oblik koji se hoće. Danas se pretpostavlja ovalni presjek jezgre umjesto ranijeg četvornog, radi manje duljine žice jednog navojka, t. j. zbog uštede na žici i smanjenja otpora. Slika 14 predočuje u presjeku ovojnicu sa zrnatom jezgrom.

Iako nije nikakva naročita poteškoća da se izrade namotaji ovojnica sa točnošću od ± 1.5% u pogledu samoindukcije, (a ova se točnost bitno ne mijenja kod modernih uređaja sa ovojnicama sa



Slika 15

prešanom jezgrom ni uslijed indukcije jakih struja v. sl. 12), ipak sve to nije dovoljno da se otkloni nedopuštena diafonija u telefonskim kablovima, u kojima se iskorišćuju fantomni krugovi čim se u svaki vod kruga uključuje posebna ovojnica (to je tako zvano »pupiniziranje sa jednostavnim ovojnicama«). Namotaji, koji se ukopčavaju u obadva voda stvarnog kruga, moraju biti namotani na istu jezgru, čime se postiže ona korist što je spomenuta u početku ovoga odjeljka. Ako se permeabilitet jezgre u pogonu nešto promijeni, to će utjecati na međusobno jednake samoindukcije obadviju polovina namotaja. Stupanj jednakosti između ovih dviju vrijednosti samoindukcija postignut fabrički (kod najmodernijih ovojnica okruglo 0,1‰) ostaje i u pogonu održan a tako isto i dopuštena diafonija postignuta u početku.



Jedna dalja pretpostavka za otklanjanje diafonije jeste u tome, da razap magnetnih linija sila ne igra nikakvu ulogu. Ovo se može postići kao što je u početku spomenuto prstenastim oblikom ovojnice i naročito dijeleći svaki polunamotaj u dvije polovine i raspodijeljujući ih alternativno prema jezgri i vanjskoj površini. Pošto se, iz razloga uštede u prostoru, Pupinove ovojnice moraju zbijeno složiti u zaštitnom sanduku, mogle bi eventualno rastepene linije sila prodrijeti i u jezgre susjednih ovojnica pa tako izazvati induktivna magnetska poremećenja u odgovarajućim krugovima t. j. prouzrokovati diafoniju. Stoga se u njemačkoj tehnici svaka ovojnica zatvara u naročitu kutiju od lima. Slaba magnetska polja, koja prodru u masivnu kutiju, proizvode u njoj vrtložne struje za koje se potroši sva energija polja, te je tako ovojnica u magnetskom pogledu sigurno zaštićen. Metalne kutije, koje su zalite izolirajućom masom, daju isto tako sigurnu zaštitu protiv prodiranja vlage u namotaje ovojnica, dok još ovojnice nisu smještene u zajednički sanduk, koji je hermetički zatvoren. Uslijed vrtložnih struja u zaštitnoj kutiji moglo bi se očekivati povećanje otpora gubitaka ovojnice, ali to ovdje ne igra nikakvu ulogu uslijed male jakosti polja razapa. Slika 15 prikazuje sanduk ovojnice firme Siemens i Halske.

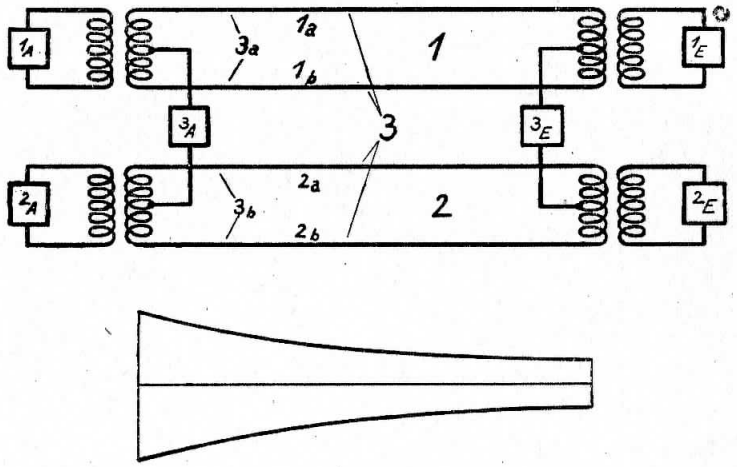
Western Electric Co. ne upotrebljuje zaštitne kutije, već radi tako, da ovojnice koje su poredane u obliku stupa okreće jedne u odnosu prema drugima dotle, dok se ne otkloni njihov međusobni utjecaj.

## 4. ISKORIŠĆENJE FANTOMNIH KRUGOVA U MEĐUGRADSKIM KABLOVIMA

Iskorišćenje međugradskog kabela može se povećati za 50% ako se, prema slici 16, iz svaka dva govorna kruga načini treći na taj način, da se oba voda ($1_a$ i $1_b$) metalnog strujnog kruga *1* i obadva voda $2_a$ i $2_b$ metalnog strujnog kruga *2* uzmu kao vodovi trećeg govornog kruga. Razumije se, da tri istovremena razgovora ne smiju jedan drugome smetati. Obadva »stvarna kruga« *1* i *2* radi stvaranja »fantomnog kruga« (ili četvornog kruga«) *3* moraju biti završena translatorima koji imaju po jednu spojnicu točno u sredini primarnog namotaja koji se veže na liniju.

Obadvije polovine namotaja treba da su, po mogućnosti što točnije izjednačene i simetrično raspoređene na prstenastoj jezgri

translatora. Ako pretpostavimo da su obadva voda i jednog i drugog stvarnog kruga simetrični onda će u jednom određenom trenutku govorna struja, koja polazi iz aparata $3_A$ imati isti prividni otpor u gornjim polovinama namotaja lijevih translatora, vodovima $1_a$ i $2_a$ u gornjim polovicama namotaja translatora na desnoj strani, kao i u donjim polovicama namotaja promatranih translatora i u vodovima $1_b$ i $2_b$. Gornja struja dijeli se dakle na dva jednaka dijela koji se ponovo sjedinjuju na spojnicama za aparat $3_E$. Pošto kroz svaku polovinu primarnog namotaja translatora teku struje iste jakosti a suprotnog smijera, to će ona proizvoditi



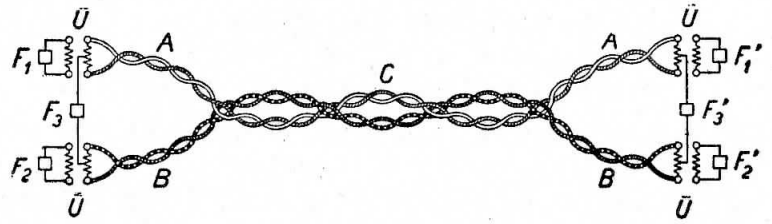

Slika 16

u jezgri magnetna polja suprotnog smijera a iste jakosti koja će se poništavati i neće proizvoditi u sekundarnom namotaju nikakve inducirane napone. U aparatima $1_A$, $2_A$, $1_E$ i $2_E$ na krajevima stvarnih krugova neće se, dakle, čuti razgovor koji se vodi po fantomnom krugu. Polovine primarnih namotaja translatora za fantomni krug znače samo omske otpore. Pošto su ovi otpori neznatni, oni ne slabe primjetno govor na fantomnom krugu.

Promatrajmo sad obrnuto, na pr. djelovanje stvarnog kruga *1* na fantomni krug *3*, pa ćemo vidjeti slijedeće: Pošto su obje polovine primarnog translatora priključenog na aparat $1_A$ jednake, to je potencijal srednje točke uvijek u sredini potencijala krajeva namotaja (sl. 16 dolje). Na vodovima $1_a$ i $1_b$, koji leže simetrično jedan prema drugom, potencijali pojedinih točaka približavati će se jedan drugom za iste iznose uslijed pada napona na liniji idući na



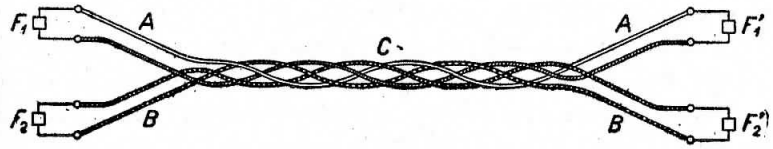
primarnom namotaju translatora priključenog na aparat $1_B$. Govorna struja zatvara se preko ovog namotaja proizvađajući u njegovim polovicama jednake padove napona. Dakle, srednja točka ovoga translatora ima potencijal opet u sredini potencijala krajeva namotaja. Iz slike 16 dolje vidimo da potencijali srednjih točaka imaju uvijek istu vrijednost nezavisno od veličine i pravca promjena potencijala u namotajima translatora. Prema tome nema nikakvoga razloga da se u fantomnom krugu pojavi struja izjednačenja; u aparatima $3_A$ i $3_B$ ne čuje se ništa od onoga što se govori




Slika 17

na stvarnim krugovima, odn. sa ovih ne ide nikakva energija u aparate $3_A$ i $3_B$.

Da se sva tri ovakva razgovora mogu obavljati bez smetnje, t. j. da ne bude nikakve diafonije (preslušavanja) između




Slika 18

stvarnih krugova i fantomnog kruga, o čemu ćemo detaljnije govoriti u odjeljku 6, potrebno je da postoji što je moguće bolja »poprečna simetrija« u konstrukciji kabela. — Pošto je kod običnog kabela otpor fantomnog kruga dva puta manji od otpora stvarnog kruga, to je potrebno, da bi se dobilo isto gušenje za sva tri govorna kruga, da fantomni krug ima dva puta veći kapacitet od faktičnog kruga. Ima više vrsti predenja žica kod telefonskih kablova, koje sasvim zadovoljavaju prvi uslov ako je fabrikacija dobra, dok spomenuti odnos kapaciteta ni u jednom slučaju nije postignut. Kod međugradskih kablova primjenjuje se skoro isključivo »Dieselhorst-Martinovo« predenje, kod kojeg se

prvo uprede svaki par sa različitim hodom predenja a potom se dva para upredu u jednu »četvorku« opet sa drugim hodom (sl. 17). Obadva stvarna kruga i fantomni krug sačinjavaju u konstruktivnom pogledu jednu jedinicu. Odnos kapaciteta fantomnog prema stvarnom krugu iznosi 1,5 do 1,7 što zavisi od odnosa izabranih hodova kod predenja.

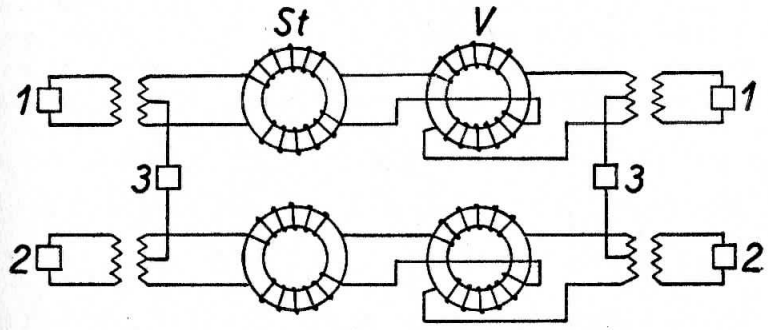
Kod druge vrste t. zv. »zvijezdastog predenja« predu se istodobno sve četiri žice jedne četvorke (sl. 18). Dvije žice, koje leže suprotno jedna drugoj, čine jedan par. Odnos kapaciteta fantomnog prema stvarnom krugu iznosi oko 2,8. Za kraće kablove, kod kojih nije rentabilno iskorišćenje fantomnih krugova, ima slijedeću ekonomsku prednost zvjezdasto predenje četvorki prema predenju u parove u Dieselhorst-Martinovom (D. M.) predenju.

Pošto stvarni krugovi u zvjezdastoj četvorci čine dvije i dvije žice koje suprotno leže to, ako je debljina izolacije ista, obje žice jednog para dalje su jedna od druge nego što je slučaj kod predenja u parove ili u D. M. četvorke. Uslijed toga je, ako je debljina izolacije jednaka, kapacitet para u zvjezdastoj četvorci manji od onoga kod predenja u parove ili D. M. četvorke, što dozvoljava da se za isti kapacitet kod zvjezdanih četvorka može uzeti tanja izolacija i time uštediti na izolacijonom materijalu a isto tako i na olovu za kablovski ovoj pošto se dobiva manji unutrašnji promjer kabela. Uz to dolazi i potpuna okruglost zvjezdaste četvorke, čime se postiže još veća ušteda u prostoru. Ako se, prema tome, sravne s jedne strane zvjezdasti kablovi a s druge strane kablovi sa običnim parovima ili D. M. četvorkama, vidjeti će se, da su zbog manjeg obujma olovnog omota zvjezdasti kablovi jeftiniji za više procenata od ovih drugih kablova, koji imaju isti broj žila, istu debljinu žica i isti kapacitet. Veličina procenta varira prema broju žila zbog više ili manje zgodne konstrukcije kablovske jezgre, a pada u koliko promjer žica raste, jer tanji zvjezdasti kabel ima prednost samo u pogledu olovnog omota dok težina bakra za obje vrste predenja ostaje ista.

Treća vrsta predenja dobiva se kad se zvjezdasto upredu ne pojedinačne žile već četiri predena para. Jedna takva dvostruka zvjezdasta četvorka ima četiri stvarna kruga i dva fantomna. Odnos između kapaciteta fantomnog i stvarnog kruga iznosi oko 1,1. Zbog većeg broja elemenata za predenje često je teško naći pogodnu konstrukciju kabela za jedan određeni broj govornih krugova.

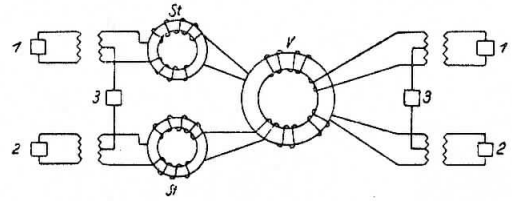


Dr. Ebeling došao je 1908. godine na misao, da se i fantomni krug optereti samoindukcijom pomoću naročitog para ovojnica pa tako iskoristi za međugradske veze. Namotaji ovih dopunskih ili »fantomnih« ovojnica tako su vezani, da struja koja teče u stvarnom krugu, protječe kroz dvije polovice namotaja ove ovojnice u suprotnim smjerovima pa tako ne magnetizira jezgru, dok struja fantomnog kruga prolazi kroz oba namotaja paralelno te se magnetska djelovanja zbrajaju (slika 19). Što se tiče ovojnica



Slika 19

za stvaran krug, kod njih se događa obrnuto. One znače za fantomni krug, kao i ovojnice za stvarni krug samo povećanje otpora za iznos omskog otpora njihovih namotaja.



Slika 20

Amerikanac Campbell predložio je, da se obje fantomne ovojnice spoje zajedno. Ako pratimo u sl. 20 stvarni i fantomni strujni krug, vidjeti ćemo da se i na ovaj način, nešto ekonomičniji zbog manjeg utroška materijala, može postići željeno djelovanje, da se sa stvarnim ovojnicama samo stvarni a sa fantomnim samo fantomni krugovi induktivno opterete.

Ako obilježimo sa $R_{0Stg}$ otpor ovojnice stvarnog kruga za istosmjernu struju, kad su obje polovice namotaja vezane u red, a sa $R_{0Vg}$ otpor zajedničke fantomne ovojnice, čije su obje polovice

namotaja koje se sastoje od po dvije paralelno vezane četvrtine namotaja, vezane u red, dobiti ćemo slijedeće: Otpor za istosmjernu struju svake od dviju polovica namotaja zajedničke fantomne ovojnice mora iznositi $\frac{R_{0Vg}}{2}$ a otpor svake četvrtine namotaja, koja vezana paralelno sa drugom čini polovinu namotaja, biti će: $2.\frac{R_{0Vg}}{2} = R_{0Vg}$. Dakle omski otpor četvrtine namotaja jednak je otporu koji cijela fantomna ovojnica predstavlja za fantomni krug. U stvarnom krugu vezane su u red po dvije četvrtine namotaja fantomske ovojnice (otpor = 2 $R_{0Vg}$). Obadvije polovice ovojnice stvarnog kruga sa omskim otporom $R_{0stg}$ vezane su u fantomnom krugu paralelno (otpor $= \frac{1}{2}\frac{R_{0Stg}}{2} = \frac{R_{0Stg}}{4}$). Struje u fantomskom krugu prolaze kroz stvarne ovojnice vezane u red, pa ove za fantomni krug predstavljaju otpor od $2.\frac{R_{0Stg}}{4} = \frac{R_{0Stg}}{2}$.

Formula gušenja iz jedn. 46 mora se uslijed pupiniziranja fantomnog kruga, pomoću zajedničke ovojnice, proširiti na slijedeći način:

$$\beta'_{St} = \left[\frac{R_{St}\left(1-\frac{2}{3}\eta_{St}^2\right)+\frac{R_{0St_{eff}}+2R_{0Vg}}{s}}{2}\sqrt{\frac{C_{St}+\frac{C_{0St}}{s}}{L_{St}+\frac{L_{0St}}{s}}}+\right.$$

$$\left.+\frac{A_{St}}{2}\sqrt{\frac{L_{St}+\frac{L_{0St}}{s}}{C_{St}+\frac{C_{0St}}{s}}}\right]\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\eta_{St}^2}},$$

$$\beta_{St} = \beta'_{St}\sqrt{\frac{2}{1+\sqrt{1+\left(\frac{\beta'_{St}\cdot s}{\eta}\right)^2}}} \qquad (49)$$

$$\beta_V = \left[\frac{R_V\left(1-\frac{2}{3}\eta_V^2\right)+\frac{R_{0V_{eff}}+\frac{R_{0Stg}}{2}}{s}}{2}\sqrt{\frac{C_V+\frac{C_{0V}}{s}}{L_V+\frac{L_{0V}}{s}}}+\right.$$



$$\left.+\frac{A_V}{2}\sqrt{\frac{L_V+\frac{L_{0V}}{s}}{C_V+\frac{C_{0V}}{s}}}\right]\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\eta_V^2}}$$

$$\beta_V = \beta'_V\sqrt{\frac{2}{1+\sqrt{1+\left(\frac{\beta'_V\cdot s}{\eta}\right)^2}}} \qquad (50)$$

Ovdje je upotrijebljena oznaka:
*St* za vrijednosti koje odgovaraju stvarnom krugu,
*V* za vrijednosti koje odgovaraju fantomnom krugu,
*o* za vrijednosti koje odgovaraju ovojnici,
$R_g$ za otpor istosmjerne struje,
$R_{eff}$ za stvarni (efektivni) otpor,
bez oznake o izražene su vrijednosti na 1 km.
Na sličan ćemo način dobiti:

$$f_{0St} = \frac{1}{\pi s\sqrt{\left(L_{St}+\frac{L_{0St}}{s}\right)\cdot\left(C_{St}+\frac{C_{0St}}{s}\right)}}$$

$$f_{0V} = \frac{1}{\pi s\sqrt{\left(L_V+\frac{L_{0V}}{s}\right)\cdot\left(C_V+\frac{C_{0V}}{s}\right)}} \qquad (51)$$

$$Z_{St} \approx \sqrt{\frac{L_{St}+\frac{L_{0St}}{s}}{C_{St}+\frac{C_{0St}}{s}}}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\eta_{St}^2}},\quad Z_V \approx \sqrt{\frac{L_V+\frac{L_{0V}}{s}}{C_V+\frac{C_{0V}}{s}}}\cdot\frac{1}{\sqrt{1-\eta_V^2}} \qquad (52)$$

U formulama, koje vrijede za stvarne krugove, uzeti su zajedno kapaciteti između obadviju polovica namotaja stvarne ovojnice i između četvrtina namotaja fantomnog kruga koje pripadaju jednom stvarnom krugu (= $C_{0St} \approx 0{,}0015\mu F$). U jednadžbama 49, 51 52 za stvarni krug javlja se, dakle, vrijednost $C_{0St}$. U jedn. 50 do 52 za fantomni krug javlja se kapacitet fantomne ovojnice ($C_{0V} \approx 0{,}0003\mu F$).

Sad ćemo vidjeti u koliko su pogodne za pupinizirane međugradske kablove tri spomenute vrste predenja. Za približno ispitivanje dovoljne su pojednostavnjene jednadžbe:

$$\beta_{St} \approx \frac{R_{St}}{2}\sqrt{\frac{C_{0St}}{L_{0St}}},\quad \beta_V \approx \frac{R_V}{2}\sqrt{\frac{C_{0V}}{L_{0V}}}, \qquad (53)$$

$$f_{0St} = \frac{1}{\pi\sqrt{L_{0St} \cdot C_{0St}}}, \quad f_{0V} = \frac{1}{\pi\sqrt{L_{0V} \cdot C_{0V}}}, \qquad (54)$$

Ovdje $R$ znači otpor na 1 km; $L_0$ samoindukciju ovojonice i $C_0$ kapacitet sekcije kabela a zanemareni su otpor i kapacitet ovojnica kao i samoindukcija kabela. U oba slučaja je $R_V = \frac{R_{St}}{2}$, kod kabela sa dvostrukim zvjezdastim četvorkama je je $C_{0V} \approx 1{,}1\ C_{0St}$ kod D. M. kabela je $C_{0V} \approx 1{,}6\ C_{0St}$ i kod kabela sa zvjezdastim četvorkama $C_{0V} \approx 2.8\ C_{0St}$. Dobiti ćemo za kablove sa dvostrukim zvjezdastim četvorkama:

$$\beta_{V_{Dst}} \approx \frac{R_{St}}{4}\sqrt{\frac{1{,}1\ C_{0St}}{L_{0V}}}, \left(\frac{\beta_V}{\beta_{St}}\right)_{Dst} \approx \frac{1}{2}\sqrt{1{,}1\frac{L_{0St}}{L_{0V}}} = 0{,}52\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}},$$

$$f_{0V_{Dst}} = \frac{1}{\pi\sqrt{L_{0V} \cdot 1{,}1\ C_{0St}}}, \left(\frac{f_{0V}}{f_{0St}}\right)_{Dst} = \frac{1}{\sqrt{1{,}1}}\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}} = 0{,}95\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}},$$

Za D. M. kablove:

$$\beta_{V_{DM}} \approx \frac{R_{St}}{4}\sqrt{\frac{1{,}6\ C_{0St}}{L_{0V}}}, \left(\frac{\beta_V}{\beta_{St}}\right)_{DM} \approx \frac{1}{2}\sqrt{1{,}6\frac{L_{0St}}{L_{0V}}} = 0{,}63\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}},$$

$$f_{0V_{DM}} = \frac{1}{\pi\sqrt{L_{0V} \cdot 1{,}6\ C_{0St}}}, \left(\frac{f_{0V}}{f_{0St}}\right)_{DM} = \frac{1}{\sqrt{1{,}6}}\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}} = 0{,}79\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}}$$

Za kablove sa zvjezdastim četvorkama:

$$\left(\frac{\beta_V}{\beta_{St}}\right)_{St} \approx \frac{1}{2}\sqrt{2{,}8\frac{L_{0St}}{L_{0V}}} = 0{,}84\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}},$$

$$\left(\frac{f_{0V}}{f_{0St}}\right)_{St} = \frac{1}{\sqrt{2{,}8}}\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}} = 0{,}60\sqrt{\frac{L_{0St}}{L_{0V}}}.$$

Ako hoćemo da i stvarni i fantomni krug imaju isto gušenje, za čim se ide zbog jednakih razmaka amplifikatora (odjeljak 10), to će biti za kablove sa dvostrukim zvjezdastim četvorkama:

$$\left(\frac{L_{0V}}{L_{0St}}\right)_{Dst} = 0{,}52^2 = 0{,}27, \left(\frac{f_{0V}}{f_{0St}}\right)_{Dst} = \frac{0{,}95}{0{,}52} = 1.83,$$

Za D. M. kablove:

$$\left(\frac{L_{0V}}{L_{0St}}\right)_{DM} = 0{,}63^2 = 0{,}40, \qquad \left(\frac{f_{0V}}{f_{0St}}\right)_{DM} = \frac{0{,}79}{0{,}63} = 1{,}25$$

za kablove sa zvjezdastim četvorkama:



$$\left(\frac{L_{0V}}{L_{0St}}\right)_{St} = 0{,}84^2 = 0{,}70, \qquad \left(\frac{f_{0V}}{f_{0St}}\right)_{St} = \frac{0{,}60}{0{,}85} = 0{,}71.$$

Fantomni krugovi D. M. kablova imaju za isto gušenje graničnu frekvenciju za 25% veću nego stvarni krugovi što je od koristi, za rad sa amplikatorima za duplu liniju prema odjeljku 9 i za kvalitet prenosa govora za najveće daljine prema odjeljku 10. Fantomni krugovi kablova sa zvjezdastim četvorkama imaju pod istim uslovima naprotiv u toliko nižu graničnu frekvenciju te su praktično neupotrebljivi. Fantomni krugovi kablova sa dvostrukim zvjezdastim četvorkama u ovom su pogledu najbolji. Budućnost će pokazati da li će ovi kablovi i kraj svoje komplicirane konstrukcije zauzeti svoje mjesto u tehnici međugradskih kablova.

Dosadašnje njemačke standardne vrijednosti samo-indukcije ovojnica za normalno pupinizirani D. M. kabel jesu 0,20 i 0,19 H za stvarne ovojnice i 0,07 H za fantomne ovojnice; prema tome je $\frac{L_V}{L_{St}} = 0{,}35$ odn. 0,37. U novije vrijeme predloženo je 0,14 H za stvarne ovojnice i 0,056 za fantomne ovojnice, dakle $\frac{L_V}{L_{St}} = 0{,}4$. Amerikanci upotrebljavaju 0,177 H za stvarne ovojnice i 0,063 H za fantomne t. j. $\frac{L_V}{L_{St}} = 0{,}356$.

U patentnoj literaturi nalazi se znatan broj konstrukcija ovojnica kod kojih se pomoću zajedničke jezgre mogu opteretiti samoindukcijom i stvarni i fantomni krugovi. Najpoznatiji oblik potječe od prof. Pleijela iz Stockholma; dvije prstenaste jezgre vezane su međusobno pomoću željezne poluge koja veže dvije točke koje leže dijametralno suprotno na prstenima. Namotaji, koji se umeću u vodove prvog stvarnog kruga jedne četvorke, tako su namotani oko jedne polovine prve prstenaste jezgre da će govorne struje toga kruga proizvoditi u jezgri zatvoreno magnetsko polje. Isto to vrijedi i za drugi stvarni krug i drugu prstenastu jezgru. Znamo iz ranijih razmatranja, da struje fantomnog kruga koje protječu paralelno kroz obadva namotaja jedne prstenaste jezgre, kruže u suprotnom smislu oko jezgre, te stvaraju polove na mjestima gdje je učvršćena željezna poluga. Magnetno polje, koje služi za opterećenje fantomnog kruga, može se zatvoriti preko obiju željeznih poluga.

Ako je simetrija potpuna, magnetna polja za opterećenje stvarnih i fantomnih krugova ne utiču jedna na druga pa nema ni-

kakve diafonije između tri govorna kruga, koja su istovremeno sominduktivno opterećena pomoću Pleijel-ove ovojnice. Ali, ova se simetrija može postići samo pomoću naročitih pomoćnih sredstava (pomoćni namotaji i t. d.). Ovo teško i skupo postizavanje simetrije učinilo je, da Pleijelove ovojnice nisu našle u praksi nikakvu veću primjenu.

Kod Krarupovih kablova (odjeljak 2) samoindukcija fantomnog kruga, koji se dobiva paralelnim vezanjem dvaju faktičnih krugova, automatski je jednaka polovini samoindukcije jednog stvarnog kruga.

Završiti ćemo ovaj odjeljak proračunom jednog praktičnog primjera za Pupinov kabel, sa iskorišćenjem fantomnih krugova. Neka je promjer žice 0,9 mm., razmak između ovojnica s = 1,7 km. Za 800 Herca biti će:

| U stvarnom krugu: | U fantomnom krugu: |
|---|---|
| $R_{St} = 54{,}6$ Oma/km | $R_V = 27{,}3$ Oma/km |
| $A_{St} = 0{,}6\ \mu S$/km | $A_V = 1{,}0 \mu S$/km |
| $C_{St} = 0{,}0335 \mu F$/km | $C_V = 0{,}054 \mu F$/km |
| $L_{St} = 0{,}6$mH/km | $L_V = 0.4$ mH/km |
| $L_{0St} = 0{,}14$H | $L_{0V} = 0{,}056$ H |
| $R_{0St} = 4{,}8$ Oma | $R_{0V} = 1{,}35$ Oma |
| $R_{0Steff} = 6{,}3$ Oma | $R_{0Veff} = 1{,}85$ Oma |
| $C_{0St} = 0{,}0015 \mu F$ | $C_{0V} = 0{,}0003 \mu F$ |

Jedn. 51:

$$f_{0St} = \frac{1}{\pi \cdot 1{,}7 \sqrt{\left(0{,}0006 + \frac{0{,}14}{1{,}7}\right)\left(0{,}0335 + \frac{0{,}0015}{1{,}7}\right) \cdot 10^{-6}}}$$

$$= \frac{1000}{\pi \cdot 1{,}7 \sqrt{0{,}0829 \cdot 0{,}0344}} = 3510 \text{ Herza}$$

$$f_{0V} = \frac{1}{\pi \cdot 1{,}7 \sqrt{\left(0{,}0004 + \frac{0{,}056}{1{,}7}\right)\left(0{,}0540 + \frac{0{,}0003}{1{,}7}\right) \cdot 10^{-6}}}$$

$$= \frac{1000}{\pi \cdot 1{,}7 \sqrt{0{,}0333 \cdot 0{,}0542}} = 4420 \text{ Herza}$$

Jedn. 23:

$$\eta_{St} = \frac{800}{3510} = 0{,}227, \qquad \eta_V = \frac{800}{4420} = 0{,}181.$$



Jedn. 49:

$$\beta'_{St} = \left[\frac{54{,}6\left(1 - \frac{2}{3} \cdot 0{,}227^2\right) + \frac{6{,}3 + 2 \cdot 1{,}35}{1{,}7}}{2} \sqrt{\frac{0{,}0344 \cdot 10^{-6}}{0{,}0829}} + \frac{0{,}6 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{0{,}0829}{0{,}0344 \cdot 10^{-6}}}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 0{,}227^2}} =$$

$$= 10^{-3}\,(29, \sqrt{0{,}415} + 0{,}3 \sqrt{2{,}410}) \frac{1}{\sqrt{0{,}948}}$$

$$= 10^{-3}\,(29{,}0 \cdot 0{,}644 + 0{,}3 \cdot 1{,}553) \frac{1}{0{,}975}$$

$$= 0{,}0182 + 0{,}0005 = 0{,}0197,$$

$$\beta_{St} = 0{,}0197 \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{\left(\frac{0{,}0197 \cdot 1{,}7}{0{,}227}\right)^2}}} = 0{,}0197 \cdot 0{,}997 = 0{,}0196 \text{ Nep./km}$$

Jedn. 50:

$$\beta'_V = \left[\frac{27{,}3\left(1 - \frac{2}{3} \cdot 0{,}181^2\right) + \frac{1{,}85 + \frac{4{,}8}{2}}{1{,}7}}{2} \sqrt{\frac{0{,}0542 \cdot 10^{-6}}{0{,}0333}} + \frac{1{,}0 \cdot 10^{-6}}{2} \sqrt{\frac{0{,}0333}{0{,}0542 \cdot 10^{-6}}}\right] \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 0{,}181^2}} =$$

$$= 10^{-3}\ (14{,}6 \sqrt{1{,}626} + 0{,}5 \sqrt{0{,}615}) \cdot \frac{1}{\sqrt{0{,}967}}$$

$$= 10^{-3}(14{,}6 \cdot 1{,}275 + 0{,}5 \cdot 0{,}783) \frac{1}{0{,}983}$$

$$= 0{,}0190 + 0{,}0004 = 0{,}0194.$$

$$\beta_V = 0{,}0194 \sqrt{\frac{2}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{0{,}0194 \cdot 1{,}7}{0{,}181}\right)^2}}} = 0{,}0194 \cdot 0{,}995 = 0{,}0193 \text{ Nepera/km}$$

Jedn. 52:

$$Z_{St} \approx \sqrt{\frac{0{,}0829}{0{,}0334 \cdot 10^{-6}}} = 1550 \text{ Oma},$$

$$Z_V \approx \sqrt{\frac{0{,}0333}{0{,}0542 \cdot 10^{-6}}} = 780 \text{ Oma}.$$

Vidimo da dio gušenja, koji dolazi zbog ovoga, iznosi samo 2 do 2,5% ukupnog gušenja.

Novi Pupinovi kablovi sa s = 1,7 km za 800 Herca imaju približno vrijednosti dane u tablici II, u kojoj je dodana i granična frekvencija $f_0$:

Tablica II

| ⌀ mm | R Oma/km | | A μS/km | | C μF/km | | $L_0$ H | | β Nepera/km | | $f_0$ Herca | | Z (velič.) Oma | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | stvarno | fantom | stvarno | fantom | stvarno | fantom | stvarno | fantom | stvarno | fantom | stvarno | fantom | stvarno | fantom |
| 0,6 | 123,0 | 61,5 | 0,5 | 0,8 | 0,0325 | 0,053 | 0,140 | 0,056 | 0,040 | 0,040 | 3550 | 4450 | 1580 | 790 |
| 0,8 | 69,2 | 34,6 | 0,5 | 0,8 | 0,033 | 0,0535 | 0,140 | 0,056 | 0,024 | 0,024 | 3500 | 4400 | 1570 | 790 |
| 0,9 | 54,6 | 27,3 | 0,6 | 1,0 | 0,0335 | 0,054 | 0,140 | 0,056 | 0,020 | 0,019 | 3500 | 4400 | 1550 | 780 |
| 1,0 | 44,3 | 22,2 | 0,6 | 1,0 | 0,034 | 0,056 | 0,140 | 0,056 | 0,016 | 0,016 | 3500 | 4350 | 1540 | 770 |
| 1,2 | 30,8 | 15,4 | 0,7 | 1,1 | 0,0345 | 0,057 | 0,140 | 0,056 | 0,012 | 0,012 | 3450 | 4300 | 1530 | 760 |
| 1,4 | 22,6 | 11,3 | 0,7 | 1,1 | 0,0355 | 0,0585 | 0,140 | 0,056 | 0,010 | 0,010 | 3400 | 4250 | 1510 | 750 |
| 1,5 | 19,7 | 9,9 | 0,7 | 1,1 | 0,036 | 0,0595 | 0,140 | 0,056 | 0,009 | 0,009 | 3400 | 4200 | 1500 | 750 |
| 1,8 | 13,7 | 6,9 | 0,7 | 1,1 | 0,037 | 0,061 | 0,140 | 0,056 | 0,007 | 0,007 | 3350 | 4150 | 1480 | 740 |
| 2,0 | 11,0 | 5,5 | 0,8 | 1,3 | 0,038 | 0,063 | 0,140 | 0,056 | 0,006 | 0,006 | 3300 | 4000 | 1460 | 730 |

Tablica III daje naprotiv internacionalno standardizirane odgovarajuće vrijednosti za sisteme pupiniziranja. Sistemske oznake potiču od komiteta C. C. I. (Comité Consulatif International des Communications Téléphoniques à Grande Distance). Sistem Ia je amerikanski Ib dosadanji a II novi njemački standard sistem. Što se tiće lakog pupiniziranja vidjeti odjeljak 10.

Tablica III

| Pupinovanje | Sistem | ⌀ mm | C μF/km | | $L_0$ H | | s km | β Nepera/km | | $f_0$ Herca | | Z (velič.) Oma | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | stvarno | fantom | stvarno | fantom | | stvarno | fantom | stvarno | fantom | stvarno | fantom |
| normalno | Ia | 0,9 | 0,0358 | 0,0625 | 0·0177 | 0,063 | 1,83 | 0,020 | 0,021 | 2900 | 3600 | 1590 | 740 |
| | | 1,3 | | | | | | 0,011 | 0,012 | | | | |
| | Ib | 0,9 | 0,0335 | 0,054 | 0,200 | 0,070 | 2,00 | 0,019 | 0,020 | 2750 | 3650 | 1730 | 800 |
| | | 1,4 | 0,0355 | 0,0585 | 0,190 | | | 0,010 | 0,010 | 2750 | 3500 | 1630 | 780 |
| | II | 0,9 | 0,0335 | 0,054 | 0,140 | 0,056 | 1.70 | 0,020 | 0,019 | 3500 | 4400 | 1550 | 780 |
| | | 1,4 | 0.0355 | 0,0585 | | | | 0,010 | 0,010 | 3400 | 4250 | 1510 | 750 |
| lako | Ia | 0,9 | 0,0385 | 0,0625 | 0,044 | 0,025 | 1,83 | 0,036 | 0,030 | 5800 | 6000 | 790 | 470 |
| | Ib | 0,9 | 0,0335 | 0,054 | 0,050 | 0,020 | 2,00 | 0,033 | 0,032 | 5350 | 6850 | 860 | 440 |



# 5. PRESLUŠAVANJE
## (Diafonija)

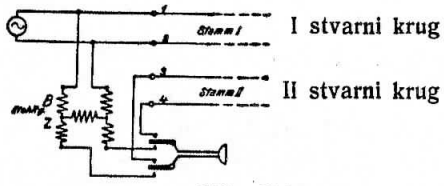
Za uredan telefonski saobraćaj pretpostavlja se, da dva pretplatnika, koji međusobno govore ne čuju ono što se govori na ostalim linijama u istom kabelu. Pretpostavlja se, dakle, da ne smije biti nikakvog preslušavanja (diafonije) koje bi smetalo. Kad bi se razumjelo ono što se govori na ostalim linijama nanosila bi se povreda telofonkoj tajni, ali i nerazumljivi šumovi smetaju pravilno obavljanje razgovora. Veličinu preslušavanja određujemo gušenjem jedne zamišljene linije koja, direktno vezana između uzroka smetnje i onoga koji smetnju osjeća, proizvodi isto gušenje kao što se događa između dva govorna kruga.

Ako je gušenje razgovora koji se preslušava $b > 7,5$ Nepera onda se ni pojedinačni odlomci toga razgovora ne mogu razumjeti; ako je $b > 6$ Nepera nije praktično moguće razumjeti potpuni smisao razgovora. Za internacionalne kablove propisana je minimalna vrijednost gušenja $b = 7,5$ Nepera t. j. manje od 3,2 milionita dijela energije smije se prenijeti sa jednog na drugi govorni krug. Obični telefonski kablovi imaju gušenje preslušavanja $b = 6$ do 8 Nepera, dok se primjenom naročitih metoda izjednačenja, koje ćemo opisati, postiže još veće smanjenje preslušavanja te se prosječno dobiva $b > 9$ Nepera, što odgovara odnosu primarne i prenesene energije u iznosu preko 64 miliona. Često su vrijednosti za $b$ veće od 11 Nepera što odgovara odnosu energija od preko 3,5 milijarde. Da bi se razumjela teškoća u rješavanju ovoga zadatka, treba se sjetiti, da se žile u kablovima sa papirnom izolacijom fabriciraju u masi na stotine i hiljade kilometara duljine koji idu paralelno na samo nekoliko milimetara razmaka i da između takvih vodova treba da se dobiju gore navedene vrijednosti preslušavanja, naročito između tri govorna kruga jedne četvorke.

Često se u literaturi želi upotrijebiti jedan izraz za preslušavanje između krugova raznih četvorka a drugi za preslušavanje između krugova u jednoj četvorci. Međutim, ovakva podjela nije opravdana, pošto tu nema principijelne razlike niti u uzrocima niti u posljedicama. Radi toga mi ćemo zadržati opći izraz »preslušavanje« za sve ove pojave.

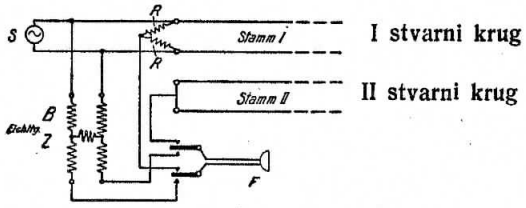
Mjerenje preslušavanja vrši se na slijedeći način (sl. 21): Iz oscilatora šalje se izmjenična struja istovremeno u liniju sa koje dolazi preslušavanje (u slici 1, 2 — stvarni krug I) i umjetnu liniju sa promjenjivim gušenjem $b$. Ispitna slušalica se izmjenično stavlja

na liniju na kojoj se preslušavanje mjeri (3,4 — stvarni krug II) i na umjetnu liniju. Gušenje $b$ umjetne linije regulira se dotle, dok ne dobijemo u obadva položaja istu jakost tona. U tom slučaju iznos koji pročitamo na skali umjetne linije predstavlja gušenje preslušavanja (vidjeti jedn. 9e). Prividni otpor Z umjetne linije treba da se slaže sa valnim otporom linije na kojoj se mjeri preslušavanje, da ne bi rezultat mjerenja bio pogriješan uslijed raz-




Slika 21

nih djelovanja refleksije u slušalici. Prividni otpor umjetne linije, ne mora se slagati sa valnim otporom linije sa koje se preslušavanje prenosi pošto je ulazni napon za obadva kruga automatski isti, jer je oscilator vezan paralelno.




Slika 22

Potrebno je, dakle, da se upotrijebi umjetna linija sa promjenljivim gušenjem $b$ i promjenljivim prividnim otporom Z. Pošto kod ovih mjerenja dolaze u obzir velika gušenja, to je udešavanje željenog prividnog otpora omogućeno jednostavnim vezanjem u red jednog otpora na izlazu umjetne linije, čime se osjetljivo ne utječe na rezultat mjerenja.

Radi mjerenja preslušavanja sa stvarnog kruga na fantomni, ovaj poslednji može se najtočnije realizirati pomoću dva jednaka otpora $R$, od kojih svaki ima, na pr. po 1000 Oma (sl. 22).

U anglosaksonskim zemljama mjeri se jakost preslušavanja tako, da se ispitna slušalica stavlja naizmjence na liniju, na kojoj se mjeri preslušavanje, i na spojnice potenciometra etaloniranog u miliontnim dijelovima na čijim se krajevima nalazi napon oscila-



tora koji istovremeno napaja i liniju sa koje dolazi preslušavanje. Gušenju preslušavanja između normalno pupiniziranog stvarnog i fantomnog kruga od $b = 7{,}5$ Nepera odgovara, na pr., okruglo 550 milionitih ili »jedinica gušenja«, za $b = 9$ Nepera odgovara 120, a za $b = 11$ Nepera okruglo 25 milionitih.

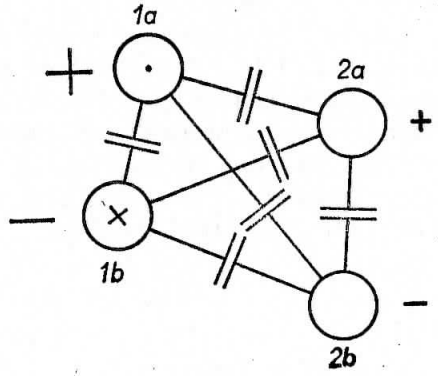
Preslušavanje u kablovima djelomično je induktivne a djelomično kapacitetne prirode. Najprije ćemo ukratko prikazati uzajamno induktivno djelovanje dvaju susjednih strujnih krugova. Izmjenična struja, koja protječe kroz jedan krug, izaziva u susjednom krugu indukcioni napon, čim izmjenično magnetsko polje prvog kruga, makar i djelomično, zahvati i drugi krug. U koliko je prvi krug veći u toliko je veća magnetna struja i u koliko je drugi krug veći i bliže u toliko će se veći indukcioni napon proizvesti u njemu. U cilju uštede u prostoru kod kablova se teži za što većim približavanjem žila, te se smanjivanje uzajamnog induktivnog djelovanja može postići samo tako, ako se površina vodova smanji. U početku telefonije uobičajeni način eksploatacije samo sa jednim vodom i zemljom kao povratnim vodom bio bi sasvim nemoguć zbog veličine površine provodnika koji uzajamno djeluju jedan na drugog. Da se što više smanji površina voda prešlo se sasvim na potrebu duplih vodova čvrsto upredenih (vidjeti odjeljak 5). Kao što bliže ispitivanje pokazuje, induktivno preslušavanje može se još i na taj način smanjiti, ako magnetna polja mijenjaju svoj pravac u svakom hodu predenja.

Kod Krarup-kablova induktivno preslušavanje može biti jače od kapacitetnog. Magnetno polje, koje se zatvara oko svake žile dijeli se u razmjeru permeabiliteta željezne Krarupove spirale (oko 160 elektromagnetnih jedinica po odjeljku 2) prema permeabilitetu 1 izolacije sastavljene od papira i zraka. Kod ovoga se ne uzima u obzir opadanje jakosti magnetskog polja sa udaljenošću od voda. Znamo, da jedan znatan dio magnatnih silocrta protječe izvan Kraupovog namotaja. Željezna špirala u susjednom vodu predstavlja s druge strane najzgodniji put za linije sila tako, da kod Krarup-kablova magnetsko izmjenično polje mnogo lakše prodire u susjedni krug no što je to slučaj kod običnih ili pupiniziranih kablova.

Samoindukcione ovojnice pupiniziranih linija u magnetskom polju zaklonjene su jedne od drugih, kao što je opisano u odjeljku 4, ili su okretanjem dovedene u takav položaj, da je njihovo uzajamno induktivno djelovanje minimalno. Nešto drukčije stoji stvar kod zajedničkih fantomnih ovojnica (odjeljak 5) čiji su namotaji

ukopčani u obadva stvarna kruga a nalaze se na zajedničkoj jezgri. U ovome slučaju potrebno je naročito približno izjednačenje namotaja tako, da se magnetska polja stvarnih krugova, koja protječu u suprotnim pravcima kroz jezgru, potpuno ponište, da ne dođe do induktivne sprege stvarnih krugova uslijed fantomne ovojnice.

Kapacitivno preslušavanje nadmoćnije je u običnim i naročito u pupiniziranim kablovima uslijed većeg napona koji se primjenjuje (odjeljak 2). Vodovi višestrukog kabla odvojeni izolacijom od papira i zraka i olovni omotač koji je vezan sa zemljom mogu se shvatiti kao armature jednog kondenzatora, ako promatranje ograničimo na dovoljno kratke dijelove kabela uzduž kojih pad




Slika 23

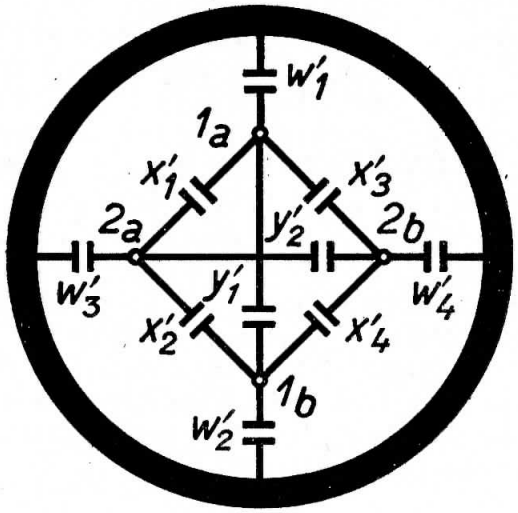
napona nije osjetan. Za slijedeća principijelna promatranja sekcije pupiniziranog kabela predstavljaju dovoljno kratke duljine.

Izmjenični naponi govornih struja u jednom strujnom krugu proizvode izmjenična polja između provodnika. U jednom momentu na pr. protječe govorna struja kroz par *1* i to dolazeći po gornjem vodu *1a* a vraćajući se po donjem *1b* (sl. 23); u tom slučaju gornji vod ima viši potencijal a donji niži. Susjedni vodovi koji se nalaze u električnom polju, imaju potencijale između tih granica a visina tih potencijala ovisi od različnih vrijednosti »kapaciteta sprege« u odnosu prema vodovima prvoga para. Dovodni vod *2a* susjednog para *2* ima uopće drugačiji potencijal nego povratni vod *2b*. Između vodova *2a* i *2b* postoji razlika napona koja izaziva protjecanje struje u tome krugu. Dakle, na drugom govornom krugu ćemo ćuti govor koji se obavlja na prvom.

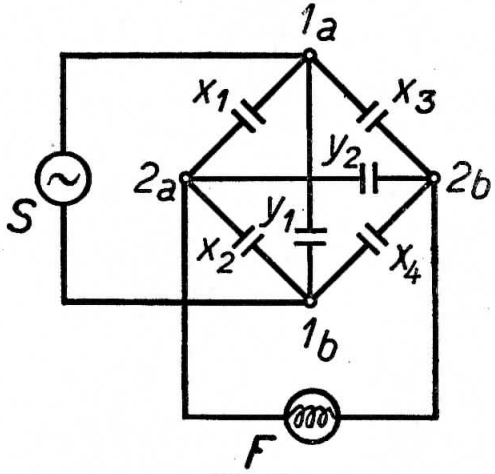
Zadržati ćemo se prvo na uzajamnim odnosima triju govornih krugova jedne četvorke i radi toga ćemo proučiti šemu djelomičnih



kapaciteta u sl. 24. Obadva para *1a*, *1b* i *2a*, *2b*, koji čine četvorku, vezani su pomoću »bočnih« djelomičnih kapaciteta $x_1'$, $x_2'$ $x_3'$, $x_4'$ uz koje idu kapaciteti parova $y_1$, i $y_2'$, — Osim toga, vodovi pro-




Slika 24




Slika 25

matrane četvorke imaju djelomične kapacitete prema svima vodovima koji su u blizini i prema olovnom omotu. Obližnji vodovi i olovni omoti mogu se u električnom pogledu zamijeniti jednim

omotom vezanim sa zemljom prema kome vodovi promatrane četvorke imaju kapacitete $w_1'$ do $w_4'$.

U pojednostavnjenoj šemi u sl. 25 kapaciteti prema zemlji unijeti su u bočne kapacitete i kapacitete parova. U daljem izlaganju će biti detaljnije prikazani međusobni odnosi.

Kako nastaje sad, na pr. preslušavanje sa kruga *1* na krug *2*? Između *1a* i *1b* postoji izmjenični napon govorne struje. Ovaj se napon izjednačuje najprije preko kruga koji je na kraju zatvoren, zatim preko kapaciteta $y_1$ i napokon preko bočnih kapaciteta $x_1$, $x_2$ i $x_3$, $x_4$ vezanih u red. Vodovi *2a* i *2b* imaju potencijale u sredini između potencijala vodova *1a* i *1b* kako to odgovara padu napona uslijed kapaciteta $x_1$, $x_2$ i $x_3$, $x_4$. Ako se potencijal *2a* razlikuje od potencijala voda *2b*, to će između njih postojati napon pa će nastati struja izjednačenja u krugu *2*, t. j. u ovome krugu ćemo ćuti razgovor koji se vodi u krugu *1*. Radi smanjivanja preslušavanja uslijed kapaciteta potrebno je da se pad napona na $x_1$ odnosi prema padu napona na $x_2$ isto onako kao pad napona na $x_3$ prema padu napona na $x_4$, drugim riječima između vrijednosti kapaciteta mora postojati slijedeći razmjer:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{x_3}{x_4}. \qquad (55)$$

Ako je, na pr. lijeva strana gornje jednadžbe veća od desne, dovoljno je da se poveća kapacitet $x_2$ ili $x_3$ pa da se jednakost ispostavi i preslušavanje sa kruga *1* na krug *2* odstrani.

Na sličan način neće biti preslušavanja sa kruga *2* na krug *1* ako je:

$$\frac{x_1}{x_3} = \frac{x_2}{x_4} \qquad (56)$$

Jednadžbu 55 možemo napisati i u slijedećem obliku:

$$\frac{x_1}{x_2} - 1 = \frac{x_3}{x_4} - 1,$$

$$\frac{x_1 - x_2}{x_2} = \frac{x_3 - x_4}{x_4}$$

Pošto se bočni kapaciteti međusobno malo razlikuju, možemo u nazivnik staviti $x_2 \approx x_4 \approx x_m$ pa ćemo dobiti:

$$\frac{x_1 - x_2}{x_m} \approx \frac{x_3 - x_4}{x_m}$$

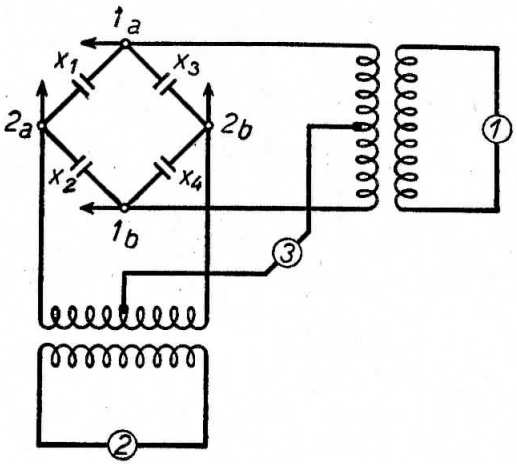
$$x_1 - x_2 \approx x_3 - x_4$$

$$x_1 + x_4 \approx x_2 + x_3$$

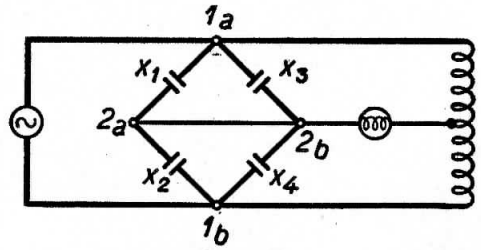


Ova jednadžba predstavlja uslov za otklanjanje preslušavanja između dva stvarna kruga. Ako je, na pr. lijeva strana veća od desne, to je dovoljno da se $x_2$ i $x_3$ poveća pa da se otkloni preslušavanje, što smo već vidjeli i u jedn. 55.

Pomoću slika 26 i 28 ćemo izvesti uslove za otklanjanje preslušavanja najprije sa stvarnog kruga *1* na fantomni krug. U ovim slikama ucrtani su samo bočni kapaciteti $x_1$ do $x_4$.




Slika 26



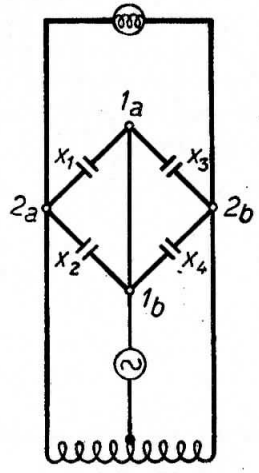

Slika 27

Aparat *1* šalje izmjeničnu govornu struju u stvarni krug *1* a na aparatu *3* u fantomnom krugu se prisluškuje (sl. 26). Omski otpor namotaja translatora mali je u odnosu prema prividnom otporu kompleksa kapaciteta između vodova jednoga para. Odnosi se neće, dakle, znatno izmijeniti kad, radi jednostavnosti kratko spojimo *2a* i *2b*.

Izvor struje *1* možemo vezati direktno u stvarni krug izostavljajući translator pa ćemo tako dobiti jednostavnu šemu u sl. 27.

Izmjenični napon između vodova *1a* i *1b* izjednačuje se preko dvije jednake duljine vodova i dvije polovine namotaja translatora, kojim se završava stvarni krug *1*, a zatim preko kapaciteta $x_1$, $x_3$ i $x_2$, $x_4$. Sredina translatora, od koje se odvaja veza za aparat kojim se zatvara fantomni krug, ima potencijal koji leži točno u sredini između potencijala *1a* i *1b*. Da ne bi kroz slušalicu protjecala nikakva struja, moraju *2b* i *2a* imati isti potencijal, t. j. pad napona na paralelnim kapacitetima $x_1$, $x_3$ mora biti jednak padu napona na kapacitetima $x_2$, $x_4$; drugim riječima, prividni otpori moraju biti jednaki, ili:

$$x_1 + x_3 = x_2 + x_4$$



Slika 28

Ako je, na pr., lijeva strana veća od desne, dovoljno je povećati kapacitet $x_2$ ili $x_4$ da se otkloni preslušavanje sa stvarnog kruga *1* na fantomni krug.

Radi ispitivanja preslušavanja, na pr. sa fantomnog kruga na stvarni krug *2*, slati ćemo iz aparata *3* u sl. 26 izmjeničnu govornu struju u fantomni krug *1*, *2* pa ćemo prisluškivati na aparatu *2* koji se nalazi u stvarnom krugu *2*. Radi jednostavnosti možemo, iz razloga ranije navedenih, na kratko spojiti *1a* i *1b*, čime se odnosi neće znatno izmijeniti. Aparat *2*, na kome kontroliramo preslušavanje, možemo vezati neposredno u krug *2* (sl. 28).

Izmjenični napon u fantomnom krugu, koji se nalazi između *1a*, *1b* i srednje točke translatora, izjednačuje se s jedne strane preko lijeve polovine namotaja, voda *2a* i paralelno vezanih kapaciteta $x_1$, $x_2$, a s druge strane preko desne polovine namotaja, voda *2b* i $x_3$, $x_4$. Da se u slušalici aparata vezanog u stvarni krug *2* nebi ništa čulo, moraju točke *2a* i *2b* biti na istom potencijalu t. j. padovi napona od sredine translatora do ovih dviju točaka moraju biti jednaki. Pošto polovine namotaja i duljine vodova, kroz koje protječe struja, imaju potpuno iste prividne otpore — što treba unaprijed pretpostaviti — moraju biti jednake i struje, koje protječu kroz njih, što povlači sa sobom i jednakost svih prividnih otpora u obadva puta kojima struja protječe. Prema tome, moraju biti međusobno jednaki i prividni otpori paralelnih kapaciteta $x_1$, $x_2$ i $x_3$, $x_4$, kroz koje ova struja protječe. Da ne bude preslušavanja mora biti:

Slika 29

$$x_1 + x_2 = x_3 + x_4 \qquad (59)$$

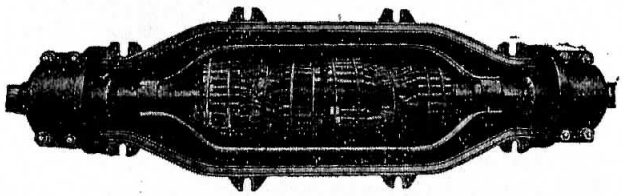
Isti uslovi 58 i 59 vrijede i za oktlanjanje ostalih mogućnosti preslušavanja između stvarnih krugova i fantomnog kruga iste četvorke. Sva tri uslova 57 do 59 mogu se istodobro samo onda ispuniti, ako su sva četiri bočna kapaciteta međusobno jednaka, u kom se slučaju, kao što to izlazi iz jednadžba 55 i 57 otklanja i preslušavanje između dva stvarna kruga.

Približna jednakost četiriju bočnih kapaciteta postiže se već kod same fabrikacije kablova ravnomjernim omotovanjem žila specijalno izrađenim papirom i vrlo brižljivim predenjem žila u parove i četvorke. Ako bi se kod predenja jedne četvorke po metodi Dieselhorst-Martinovoj uzeo isti hod za sva tri predenja, moglo bi se dogoditi, da pojedine žile susjednih parova tako nezgodno leže jedna prema drugoj, da na cijeloj duljini kabela imaju prosječno manje razmke, t. j. veće kapacitete od ostalih vodova. Da se otkloni ova mogućnost Dieselhorst i Martin predložili su, da se za sva tri predenja uzimaju različni bodovi.

Visoki zahtjevi, koji se postavljaju u pogledu preslušavanja, za međugradska kablove mogu se ispuniti samo pomoću naročitog izjednačenja razlika bočnih kapaciteta na položenim kablovima. Sekcije kabela, na kojima se vrši izjednačenje, moraju biti male u odnosu prema duljini vala titranja koja se imaju prenijeti, i to tako male, da se i omski pad napona na toj duljini može zanemariti pa se kapaciteti, koji se iz-

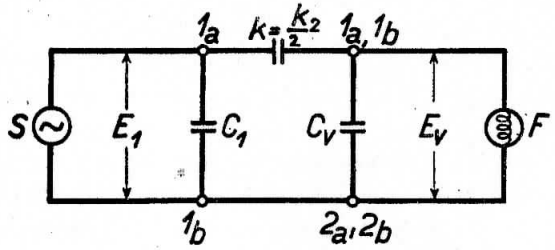
jednačuju, mogu shvatiti tako, kao da su koncetrirani u pojedinim točkama. Sekcije Pupinovog kabela predstavlajju pogodne sekcije za izjednačenje. Polusekcije na (početku i kraju Pupinovog kabela) kao i derivacije veće duljine, moraju se posebno izjednačiti.

Radi postizanja izjednačenja firme Siemens i Halske i Western Electric Co. pošle su principijelno različitim putevima. Prva umeće paralelno uz tri bočna kapaciteta svake četvorke male dopunske konenzatore, da ove kapacitete izjednači sa četvrtim najvećim bočnim kapacitetom. Ovo se umetanje dopunskih kondenza-



Slika 30

tora vrši u prvom redu u sredini svake sekcije pupiniziranog kabela. Veličina potrebnih dopunskih kondenzatora određuje se mjerenjem na položenom kabelu, a prije toga se pripremi potrebna zaliha ovih kondenzatora koji su izrađeni u stupnjevima od 10 do




Slika 31

10 μμF. U novije vrijeme upotrebljuje se kao dielektrik neimpregnirani papir sa temperaturnim koeficijentom kapaciteta koji je praktično jednak koeficijentu izolacije kabela (papir — zrak). Prema tome, promjene temperature nakako ne utječu na točnost izjednačenja.

Zavojci kondenzatora smješteni su u cijev od pertinaksa i zaliveni izolacionom masom. Na kondenzatoru se nalaze dvije izolirane žice za spajanje (sl. 29).



Tri kondenzatora potrebna za izjednačenje jedne četvorke vežu se zajedno i namjeste oko žila u kabelu slično kao metci u redeniku. Oko kondenzatora postavi se olovni muf koji se zalota na muf od lijevanog željeza, a međuprostor se zalije smolom (sl. 30). Za međugradske kablove sa velikim brojem parova preporuča se da se uzmu naročiti sanduci sa kondenzatorima.

Upoznati ćemo se sa metodom mjerenja za određivanje veličine dopunskih kondenzatora. Ranije smo vidjeli, da se preslušavanje između dva stvarna kruga jedne četvorke, ili između fantomnom kruga i jednog stvarnog kruga, može otkloniti povećanjem jednog jedinog bočnog kapaciteta, na pr. dodavanjem jednog malog kondenzatora. Prema tome mi možemo pretpostaviti, da je samo gušenje nastalo djelovanjem jednog jedinog dopunskog kapaciteta k koji postoji između jedne žile jednog para i jedne žile drugog para, kao što to pokazuje pojednostavnjena šema u sl. 31 za preslušavanje između dva stvarna kruga jedne četvorke sa kapacitetima $C_1$ i $C_2$.

Napon $E_1$, koji vlada u krugu *1* sa koga se prenosi preslušavanje izaziva u spoju u redu kapaciteta $k$ i $C_2$ struju smetnje:

$$I_{C_2} = \frac{E_1}{\frac{1}{j\omega k} + \frac{1}{j\omega C_2}} = E_1 \cdot j\omega \frac{k \cdot C_2}{k + C_2} \tag{60}$$

Napon, koji se javlja u krugu *2*, na koji se preslušavanje prenosi, jednak je padu napona na kapacitetu $C_2$ uslijed gornje struje.

$$E_2 = I_{C_2} \cdot \frac{1}{j\omega C_2} = E_1 \cdot \frac{k}{k + C_2} \approx E_1 \cdot \frac{k}{C_2}, \tag{61}$$

pošto je $k \ll C_2$

Točnost ovoga shvaćanja može se pojednostavnjeno dokazati na slijedeći način: Zamislimo prvo da su u sl. 27 izbačeni kapacitet para $y_2$ i slušalica *F*. U tom slučaju u *2a* i *2b* nema nikakvih derivacija struje pa se padovi napona $E_{x_2}$ i $E_{x_4}$ od *2a* odnosno *2b* do *1b* odnose prema ukupnom naponu $E_1$, između *1a* i *1b* kao odnosni prividni naponi:

$$\frac{E_{x_2}}{E_1} = \frac{\frac{1}{j\omega x_2}}{\frac{1}{j\omega x_1} + \frac{1}{j\omega x_2}} = \frac{1}{x_2\left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}\right)} = \frac{1}{\frac{x_2}{x_1} + 1} = \frac{x_1}{x_1 + x_2},$$

$$E_{x_2} = E_1 \cdot \frac{x_1}{x_1 + x_2}. \tag{62}$$

Na sličan ćemo način dobiti:

$$E_{x_4} = E_1 \cdot \frac{x_3}{x_3 + x_4} \tag{63}$$

Prema tome je napon između *2a* i *2b*

$$E_0 = E_{x_2} - E_{x_4} = E_1 \left( \frac{x_1}{x_1 + x_2} - \frac{x_3}{x_3 + x_4} \right). \tag{64}$$

Ovaj napon na otvorenim točkama *2a, 2b* možemo shvatiti kao elektromotornu silu, koja proizvodi smetnju i koja dolazi od strujnog izvora čiji je unutrašnji otpor

$$\rho = \frac{1}{j\omega(x_1 + x_2)} + \frac{1}{j\omega(x_3 + x_4)} \tag{65}$$

Ako zatvorimo krug na koji se preslušavanje prenosi ponovnim dodavanjem $y_2$ onda je jakost struje $I_{y2}$, koja smeta, određena po omskom zakonu zbrojem unutrašnjeg otpora i vanjskog otpora $\frac{1}{j\omega y_2}$:

$$I_{y2} = \frac{E_0}{\rho + \frac{1}{j\omega y_2}} \tag{66}$$

Napon $E_2$, koji zaista vlada između žila *2a, 2b* jednak je padu napona uslijed $I_{y2}$ na $y_2$.

$$E_2 = \frac{I_{y2}}{j\omega y_2} = \frac{E_0}{\rho \cdot j\omega y_2 + 1} \text{ (jedn. 66)}$$

$$= \frac{E_1 \left( \frac{x_1}{x_1 + x_2} + \frac{x_3}{x_3 + x_4} \right)}{\left[ \frac{1}{j\omega(x_1 + x_2)} + \frac{1}{j\omega(x_3 + x_4)} \right] \cdot j\omega y_2 + 1} =$$

$$\text{(jedn. 64 i 65)} = E_1 \frac{x_1 (x_3 + x_4) - x_3 (x_1 + x_2)}{(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)\, y_2 + (x_1 + x_2)(x_3 + x_4)}$$

$$= E_1 \frac{x_1 x_3 + x_1 x_4 - x_1 x_3 - x_2 x_3}{(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)\, y_2 + (x_1 + x_2)(x_3 + x_4)}$$

$$= E_1 \frac{x_1 x_4 - x_2 x_3}{(x_1 + x_2 + x_3 + x_4)\, y_2 + (x_1 + x_2)(x_3 + x_4)} \tag{67}$$

Pošto se kapaciteti $x_1$ do $x_4$ malo međusobno razlikuju, možemo tamo gdje se radi o malim razlikama metnuti $x_1 \approx x_2 \approx x_3 \approx x_4 \approx x_m$ i dobiti ćemo:

$$\frac{E_2}{E_1} \approx \frac{x_1 x_4 - x_2 x_3}{4 x_m \cdot y_2 + 4 x_m^2} = \frac{x_1 x_4 - x_2 x_3}{4 x_m \cdot (y_2 + x_m)}. \tag{68}$$



Iz slike 27 vidimo da se saobraćajni kapacitet $C_2$ sastoji iz kapaciteta $y_2$ vezanog paralelno sa kapacitetom $x_1\, x_3$ i $x_2\, x_4$ vezanih u seriju:

$$C_2 = y_2 + \frac{1}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_3}} + \frac{1}{\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_4}} = y_2 + \frac{x_1 x_3}{x_1 + x_3} + \frac{x_2 x_4}{x_2 + x_4}$$

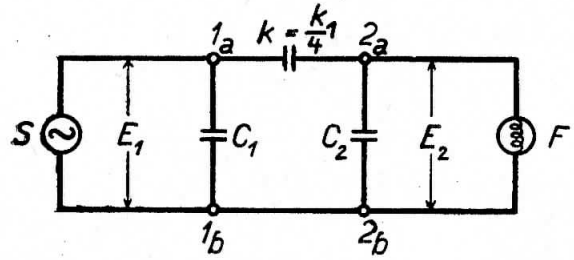
$$\approx y_2 + \frac{x_m^2}{2 x_m} + \frac{x_m^2}{2 x_m} = y_2 + x_m. \tag{69}$$

Prema tome jednadžbu 68 možemo napisati u obliku:

$$\frac{E_2}{E_1} \approx \frac{x_1 x_4 - x_2 x_3}{4 x_m C_2}. \tag{70}$$

Faktor $\frac{x_1 x_4 - x_2 x_3}{4 x_m}$ ima dimenzije kapaciteta; ako metnemo da je on jednak $k$ dobiti ćemo jednadžbu 61, čime je dokazana točnost našeg tvrđenja.

Ako je $k = o$, t. j. $x_1\, x_4 - x_2\, x_3$ ili $\frac{x_1}{x_2} - \frac{x_3}{x_4} = o$ preslušavanje će iščeznuti, kao što smo već vidjeli prema jednadžbi 55.




Slika 32

Kapacitet $k$ možemo pomoću jedne dopuštene transformacije izraziti kao aritmetički zbroj bočnih kapaciteta $x_1$ do $x_4$, stavljajući da je $x_1$ do $x_4$ jednako srednjoj vrijednosti $x_m$, u koliko se ne radi o razlikama kapaciteta:

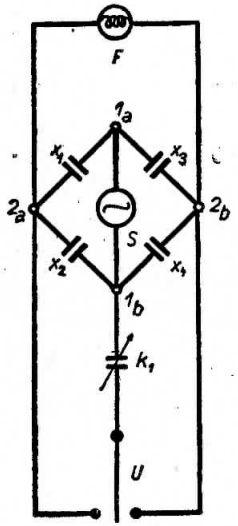
$$k = \frac{x_1 x_4 - x_2 x_3}{4 x_m} = \frac{x_2 x_4 \left( \frac{x_1}{x_2} - \frac{x_3}{x_4} \right)}{4 x_m} \approx \frac{x_m^2 \left[ \left( \frac{x_1}{x_2} - 1 \right) - \left( \frac{x_3}{x_4} - 1 \right) \right]}{4 x_m}$$

$$= \frac{x_m}{4} \left( \frac{x_1 - x_2}{x_2} - \frac{x_3 - x_4}{x_4} \right) \approx \frac{x_m}{4} \left( \frac{x_1 - x_2}{x_m} - \frac{x_3 - x_4}{x_m} \right)$$

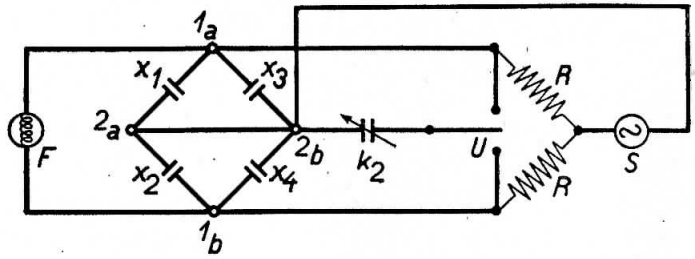
$$= \frac{(x_1 + x_4) - (x_2 + x_3)}{4} = \frac{k_1}{4}, \qquad (71)$$

Ovdje je stavljeno da je »sprega preslušavanja«, koja je mjerodavna za preslušavanje (vidjeti jedn. 57), jednaka:

$$(x_1 + x_4) - (x_2 + x_3) = k_1 = 4\,k \qquad (72)$$




Slika 33




Slika 34

Sličnim razmatranjem naći ćemo, da se i preslušavanje između stvarnog i fantomnog kruga može na odgovarajući način pomoću pojednostavnjene šeme u sl. 32 shvatiti kao posljedica kapaciteta sprege $k$ između pojedinih provodnika dvaju strujnih krugova (kratkih) koji djeluju međusobno i za koje se inače pretpostavlja da nisu nimalo spregnuti. Kao što račun pokazuje postoji odnos:



$$k = \frac{(x_1 + x_3) - (x_2 + x_4)}{2} \text{ odn. } \frac{(x_1 + x_2) - (x_3 + x_4)}{2} \qquad (73)$$

U brojnicima vidimo opet jednadžbe 58 i 59. Ovi izrazi, t. j. sprega $k$, moraju biti jednaki *0*, ako se hoće onemogućiti preslušavanje između stvarnog i fantomnog kruga. Metnuti ćemo da je razlika kapaciteta, koja je mjerodavna za preslušavanje sa stvarnog kruga *1* na fantomni krug jednaka:

$$(x_1 + x_3) - (x_2 + x_4) = k_2 = 2k \qquad (74)$$

a razlika kapaciteta koja je mjerodavna za preslušavanje sa stvarnog kruga *2* na fantomni krug

$$(x_1 + x_2) - (x_3 + x_4) = k_3 = 2\,k$$

Pošto se svaki kapacitet sprege od $k_1$ do $k_3$ sastoji iz razlike zbrojeva sve po dva bočna kapaciteta, to ove razlike mogu biti bilo pozitivne bilo negativne. Ako je na pr., $k_1$ pozitivno, t. j. $(x_1 + x_4) > (x_2 + x_3)$ u jedn. 72 onda ćemo morati uz $x_2$ ili $x_3$ dodati jedan mali kondenzator kapaciteta $k_1$ da lijeva strana jednadžbe postane jednaka *0*, te da ne bude nikakvog preslušavanja između stvarnih krugova *1* i *2*. Ako je $k_1$ negativno, onda se kondenzator $k_1$ mora vezati paralelno sa $x_1$ ili $x_4$. U slici 33 pokazan je način mjerenja kod određivanja $k_1$. *S* je oscilator koji daje frekvenciju mjerenja (na pr. 800 Herca), *F* je ispitna slušalica. Mjenjanjem kapaciteta promjenljivog kondenzatora $k_1$ ćemo dobiti za jedan od dva položaja mjenjača *U* minimum tona u slušalici.

Na sličan način određuje se na pr. $k_2$ i po jedn. 74 kondenzator te veličine mora se paralelno vezati sa $x_2$ ili $x_4$ ako je $k_2$ pozitivno, a sa $x_1$ ili $x_3$ ako je $k_2$ negativno, da se spriječi preslušavanje između fantomnog kruga i stvarnog kruga 1. Kod mjerenja prema sl. 34 fantomni krug se gradi sa dva točno jednaka otpora $R$ (na pr. svaki od 1000 Oma). Kapacitet promjenljivog kondenzatora $k_2$ treba dotle mijenjati dok se kod jednog od dva položaja mjenjača *U* ne dobije minimum tona u slušalici.

Kad smo na ovaj način odredili vrijednosti $k_1$, $k_2$ i $k_3$ i, ako je u jednom određenom slučaju $k_3$ pozitivno a $k_1$ i $k_2$ negativno, onda se $k_1$ mora dodati uz $x_1$ ili $x_4$, $k_2$ uz $x_1$ ili $x_3$ i $k_3$ uz $x_3$ ili $x_4$. Može se isto tako dodati $\frac{k_1}{2}$ uz $x_1$ i $x_4$, $\frac{k_2}{2}$ uz $x_1$ i $x_3$ i $\frac{k_3}{2}$ uz $x_3$ i $x_4$, t. j. uz $x_1$ $\frac{k_1 + k_2}{2}$ uz $x_3$ $\frac{k_2 + k_3}{2}$ i uz $x_4$ $\frac{k_1 + k_3}{2}$ dok najveći bočni

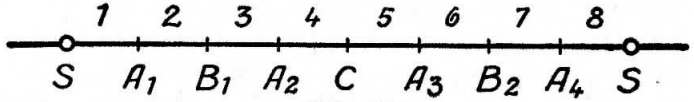
kapacitet $x_2$ ostaje nepovećan. — Ovakvo riješenje ima slijedeću prednost: Dodavanjem $\frac{k_1}{2}$ uz $x_1$ i $x_4$ jednadžbe 72, 73 i 74 biti će izmijenjene na slijedeći način:

$$\left[\left(x_1+\frac{k_1}{2}\right)+\left(x_4+\frac{k_1}{2}\right)\right]-(x_2+x_3)=(x_1+x_4+k_1)-(x_2+x_3)=0, \tag{76}$$

$$\left[\left(x_1+\frac{k_1}{2}\right)+x_3\right]-\left[x_2+\left(x_4+\frac{k_1}{2}\right)\right]=(x_1+x_3)-(x_2+x_4)=k_2, \tag{77}$$

$$\left[\left(x_1+\frac{k_1}{2}\right)+x_2\right]-\left[x_3+\left(x_4+\frac{k_1}{2}\right)\right]=(x_1+x_2)-(x_3+x_4)=k_3. \tag{78}$$

T. j. dodavanjem $\frac{k_1}{2}$ uz $x_1$ i $x_4$ otklonjeno je preslušavanje između obadva osnovna kruga a kapaciteti sprege $k_2$ i $k_3$, mjerodavni



Slika 35

za preslušavanje između svakog osnovnog kruga i fantomnog kruga, nisu mijenjani. Sličan račun pokazuje da se dodavanjem na pr. $\frac{k_2}{2}$ uz $x_1$ i $x_3$ otklanja preslušavanje između fantomnog kruga i stvarnog kruga 1 ne mijenjajući kapacitete sprege $k_1$ i $k_3$. Na ovaj se način može, nezavisno jedno od drugog, otkloniti preslušavanje između stvarnih krugova, između fantomnog kruga i prvog stvarnog kruga i napokon između fantomnog kruga i drugog stvarnog kruga.

Western Electric Co. primijenjuje radi smanjivanja preslušavanja t. zv. »metodu ukrštavanja«. Po ovoj metodi svaka sekcija kabela između Pupinovih ovojnica podijeli se na više dijelova, na pr. onoliko koliko ima komada položenog kabela. Promatrati ćemo u slici 35 na pr. odsjeke $S$—$B_1$, $B_1$—$C$, $C$—$B_2$ i $B_2$—$S$. U svakom odsjeku izmjere se kapaciteti sprege po veličini i predznaku. Potom se ponajprije u točkama $B_1$ i $B_2$ pojedini vodovi jedne grupe strujnih krugova tako međusobno vežu (ukrste), da razlike kapaciteta u dvjema polovinama sekcije ($S$—$C$ i $C$—$S$), koje se sastoje od po dva odsjeka, budu što je moguće bolje izjednačene. Isti se postupak može ponoviti i u točki $C$ tako, da se za cijelu sekciju dobije još



bolji rezultat. Ako na taj način izjednačeni kabel ne odgovara u pogledu preslušavanja propisanim uslovima, mora se dana sekcija kabela podijeliti na još veći broj dijelova nego što je u ovom primjeru navedeno.

Sve četvorke koje se nalaze u kabelu moraju se, u cilju izjednačenja pomoću ukrštavanja, podijeliti u grupe, koje se razlikuju prema debljini žica i načinu vezanja (na pr. duple linije, četvorne linije a ove poslednje prema pravcu govornih struja — vidjeti odjeljak 9. — i prema vrsti pupiniziranja — odjeljak 10). Da se dobiju zadovoljavajući rezultati, moraju se ukrštavati i razne četvorke, ali se kod toga mora ostati uvijek u istoj grupi.

Najvažnija razlika između obje vrste izjednačenja jeste u tome, što prema metodi ukrštavanja nije potrebno uvoditi jedan novi elemenat u kablovske žile, ali se radi toga žrtvuje jednolikost u nastavljanju kablova, što otežava održanje i lako mijenjanje vodova. Povećavanje saobraćajnog kapaciteta uslijed dopunskih kondenzatora neznatno je ($< 0{,}5\%$).

Ako pustimo normalni saobraćajni napon u vodove jednog kratkog dijela kabela, čije su razlike bočnih kapaciteta izjednačene pomoću kondenzatora ili metodom ukrštavanja, dobiti će se simetrična podjela potencijala između četiri voda jedne četvorke, ali ove simetričnosti neće biti u odnosu ovih vodova prema zemlji, pošto su kompleksi kapaciteta između vodova međusobno jednaki a prema zemlji imaju različite vrijednosti (vidi sl. 24). Ako nastavimo više izjednačenih dijelova kabela, to će odgovarajući vodovi i omoti nastavljenih dijelova imati silom okolnosti isti potencijal, morati će, dakle, nastupiti pomak potencijala u vodovima, te će se njihova međusobna simetrija pokvariti. Prema tome, pri nastavljanju kablova pojavljuju se preostale sprege preslušavanja, koje se mogu na svaki način zanemariti kod kablova koji su vrlo ravnomjerno izjednačeni, te se može primijeniti opisano izjednačenje kablova po sekcijama pomoću dopunskih kondenzatora ili ukrštavanjem, pod predpostavkom, da su i umetnute Pupinove ovojnice u vrlo velikoj mjeri simetrične.

Sa malo strpljivosti možemo i matematički dokazati pojavu preostalih sprega kod nastavljanja dijelova kabela koji su izjednačeni svaki za sebe, vraćajući se na točnu šemu u sl. 24 za djelomične kapacitete jedne četvorke. Izraziti ćemo sprege $k_1$ do $k_3$ pomoću djelomičnih kapaciteta $y_1'$, $y_2'$, $x_1'$ do $x_4'$ i $w_1'$ do $w_4'$. Kompleksi kapaciteta $y_1$, $y_2$ i $x_1$ do $x_4$ sastoje se očevidno iz kapaciteta $y_1'$ i $y_2'$ odn. $x_1'$ do $x_4'$ povećanih za izvjesnu vrijednost uslijed prisut-

nosti djelomičnih kapaciteta prema zemlji $w_1'$ do $w_4'$. Rezultat prostog ali obimnog računanja je slijedeći:

$$k_1 \approx (x'_1 + x'_4) - (x'_2 + x'_3) + \frac{(w'_1 - w'_2)\cdot(w'_3 - w'_4)}{w'_1 + w'_2 + w'_3 + w'_4} \tag{79}$$

$$k_2 = (x'_1 + x'_3) - (x'_2 + x'_4) + \frac{w'_1 - w'_2}{2}\left[1 - \frac{(w'_1 + w'_2) - (w'_3 + w'_4)}{w'_1 + w_2 + w'_3 + w'_4}\right] \tag{80}$$

$$k_3 = (x'_1 + x'_2) - (x'_3 + x'_4) + \frac{w'_3 - w'_4}{2}\left[1 + \frac{(w'_1 + w_2) - (w'_3 + w'_4)}{w'_1 + w'_2 + w'_3 + w'_4}\right] \tag{81}$$

Točan račun pokazuje da na desnoj strani jednadžbe 79 treba dodati korekcioni član:

$$-\frac{k_2 \cdot k_3}{x'_1 + x'_2 + x'_3 + x'_4}$$

Ali, pošto se preslušavanje između stvarnih krugova i fantomnog kruga odstranjuje nezavisno od preslušavanja između dva stvarna kruga, to u izjednačenom kabelu otpada korekcioni član. U pojavi nelinearnih članova u jednadžbama 79, 80 i 81 treba tražiti uzrok pogoršanja preslušavanja pri spajanju kratkih dijelova kabela posebno izjednačenih. Linearni članovi ovih jednadžba (bočni kapaciteti) zbrajaju se, ali to nije slučaj sa nelinearnim članovima koje sačinjavaju kapaciteti prema zemlji. Ako se u praksi pokaže potreba, najjednostavnije bi bilo da se izjednače i kapaciteti prema zemlji. To bi se moglo postići jednim ukrštavanjem svake četvorke u sredini sekcije kabela i time bi se postigli zadovoljavajući rezultati. Kao što se vidi iz jednadžbe 79 i 81 otpali bi u tom slučaju svi nelinearni članovi. Ako bi se na taj način izjednačile preostale nejednakosti kapaciteta u pojedinim kratkim dijelovima kabela, onda se ni pri spajanju ovih dijelova ne bi pojavile nikakve sprege preslušavanja.

Kod kablova sa zvjezdastim četvorkama, kod kojih se ne iskorišćuju fantomni krugovi, dovoljno je samo odstranjenje preslušavanja između dva stvarna kruga jedne četvorke pomoću jednog jedinog dopunskog kondenzatora (kompenzacija sprege $k_1$) ako, prema proširenoj jednadžbi 79, razlike kapaciteta prema zemlji i sprege $k_2$ i $k_3$ nisu previše velike.

Preslušavanje između fantomnog i stvarnih krugova nastaje i onda, kad su otpori žica jednog para ili otpori polovina namotaja Pupinove ovojnice, u većoj mjeri nejednaki, ili ako svaka polovina



namotaja ovojnice ima različnu samoindukciju. Struje fantomnog kruga koje teku paralelno po vodovima stvarnog kruga, polazeći od telefonskog aparata pa do prvog mjesta gdje se u jačoj mjeri pojavljuje nejednakost ove vrste, stvaraju u susjednim točkama obadva voda stvarnog kruga isti potencijal. Nejednakost prividnog otpora, koja se sad javlja, prouzrokuje u jednom vodu veći pad napona nego u drugom. Polazeći od ovoga mjesta, pokazati će odgovarajuće točke voda jednog stvarnog kruga potencijalnu razliku, uslijed koje će se javiti struja izjednačenja, koja će protjecati kroz aparat priključen na kraju stvarnog kruga.

Moguće je, doduše, detaljnijim postupkom izjednačenja pomoću kapaciteta odstraniti većim dijelom djelovanje i ovih nesimetrija, ali se mjesto toga pretpostavlja da se kod fabrikacije postigne takva točnost u pogledu jednakosti otpora vodova svakoga para, zatim u pogledu jednakosti otpora i samoindukcija obadviju polovina namotaja Pupinovih ovojnica, da se može ostati kod uobičajenog jednostavnog izjednačenja. Sad se već zahtijeva, da se otpori obiju vodova jednoga para u fabričkim duljinama kablova smiju razlikovati za najviše 1%, otpori namotaja dviju polovina ovojnica najviše za 0,15 Oma, a njihove samoindukcije najviše za 0,03% samoindukcije ovojnica za stvarni krug (na pr. ako je samoindukcija ovakve ovojnice 0,2 H onda za 0,06 m H).

Ako je za razmak između ovojnica od 2 km položeni kabel sastavljen iz šest duljina, onda je dopušteno razilaženje otpora za svaku duljinu oko 0,2 Oma (za promjer žila 1,4 mm). Po jednom zakonu računa vjerojatnosti iznosi srednje razilaženje otpora svih šest svojevoljno nastavljenih duljina $0{,}2\sqrt{6} \approx 0{,}5$ Oma. Kad se u ovaj kabel umetnu Pupinove ovojnice, za čije je polovine namotaja dopušteno razilaženje 0.15 Oma, onda će po istom zakonu računa vjerojatnosti iznositi srednja razlika otpora $\sqrt{0{,}5^2 + 0{,}15^2} \approx 0{,}52$ Oma, t. j. nesimetrija otpora ovojnica može se zanemariti u odnosu prema nesimetriji kabela:

Ako sa $L_a$ i $L_b$ označimo samoindukcije obadviju polovina ovojnice i stavimo:

$$\frac{L_a - L_b}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \varepsilon, \tag{82}$$

onda sprega, koja odgovara ovoj nesimetriji samoindukcija, iznosi

$$k_i = \frac{\varepsilon}{2}\sqrt{\frac{L_{0_1}}{L_{0_2}} \cdot C_{0_1} \cdot C_{0_2}} \left(= \frac{k_2}{2} \text{ odn. } \frac{k_3}{2}\right), \tag{83}$$

ako sa $L_0$ označimo samoindukciju ovojnice, sa $C_0$ saobraćajni kapacitet sekcije kabela između ovojnica, a sa oznakama 1 i 2 strujni krug koji izaziva smetnju odn. u kome se izaziva smetnja.

Ako $C_{01}$ i $C_{02}$ izrazimo u $\mu F$, a $k_i$ u $\mu\mu F$ dobiti ćemo:

$$k_i \cdot 10^{-12} = \frac{\varepsilon}{2}\sqrt{\frac{L_{0_1}}{L_{0_2}} \cdot C_{0_1} \cdot C_{0_2} \cdot 10^{-12}} = \frac{\varepsilon}{2} \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\frac{L_{0_1}}{L_{0_2}} \cdot C_{0_1} \cdot C_{0_2}},$$

$$k_i = \frac{\varepsilon}{2} \cdot 10^{6} \sqrt{\frac{L_{0_1}}{L_{0_2}} \cdot C_{0_1} \cdot C_{0_2}} \qquad (84)$$

Znamo da je prividni otpor samoindukcije, bez obzira na fazu, dan izrazom $\omega L$. Prema tome možemo nesimetriju otpora $\Delta R$, u cilju izračunavanja odgovarajuće sprege $k_r$ (bez obzira na fazu) zamijeniti približno izrazom $\Delta L = \frac{\Delta R}{\omega}$ koji ćemo uvesti u jednadžbu 82.

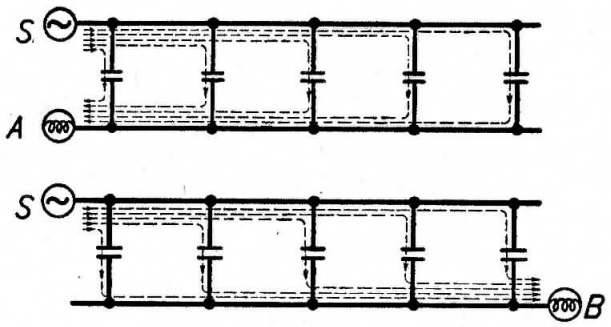
Kod normalno pupiniziranih kablova ($L_0 = 0{,}2$ H) dobiva se kod 800 Herca ($\omega = 5000$), da razlika otpora za 0,5 Oma odgovara razilaženju samoindukcije $\varepsilon = \frac{0{,}5}{5000} = 10^{-4}\,H = \frac{10^{-4}}{0{,}2} \cdot 100 = 0{,}05\%$. Ovo razilaženje ima djelovanje, prema jednadžbi 84, kao jedna sprega $k_2$ odn. $k_3 \approx 75$ $\mu\mu F$. Razlici samoindukcije od 0,03% odgovara sprega od 45 $\mu\mu F$.

Lako se uviđa da je nemoguće, da se i uz primjenu zrnaste jezgre svaki vod optereti naročitom ovojnicom, čija bi se samoindukcija mogla mijenjati za okruglo 0,5% poslije nekog slučajnog magnetiziranja (odeljak 3).

Moramo razlikovati i posebne načine mjerenja preslušavanja. Preslušavanje, koje se izvađa aparatom $S$ na jednom kraju linije, bilo da se govori ili da on izvađa zujanje (sl. 36), može se prisluškivati na obadva kraja linije na koju se preslušavanje prenosi. Ako se prisluškuju na onom kraju kabela gdje se nalazi i aparat $S$ onda se to naziva »usporedno preslušavanje« (sl. 36 gore. $A$ je aparat kojim se izaziva preslušavanje), ako se pak preslušavanje ispituje na suprotnom kraju, onda se ono naziva »ukrsno preslušavanje« (sl. 36 dolje, $B$ je aparat kojim se ispituje preslušavanje). Kapacitetne sprege u pojedinim sekcijama kabela ucrtane su kao mali kapaciteti između dva susjedna para koji su predstavljeni pravcima, isprekidanim strijelicama predstavljene su struje koje izazivaju preslušavanje. Faza ovih struja mijenja se, kao što je poznato, kod pomicanja po jednoj i drugoj liniji. Iz slike 36 gore vidimo, da se struje, koje izazivaju preslušavanje, gibaju putevima raznih duljina.



Ako, radi jednostavnosti promatramo jednu izmjeničnu struju određene frekvencije, vidjeti ćemo da njeni dijelovi, koji protječu na pojedinim mjestima sprege, napuštaju sa istom fazom liniju sa koje se prenosi preslušavanje, ali u kontrolni aparat $A$ dolaze sa najrazličnijim uzajamnim faznim pomacima uslijed različne duljine prevaljenih puteva. Prema tome potpuno je nemoguće da se preslušavanje izazvano spregama na raznim mjestima, izjednači umetanjem dopunskih kondenzatora samo na kraju kabela gdje se preslušavanje čuje. Takvo jedno izjednačenje uspjelo bi, kao što detaljnije računanje pokazuje, samo za jednu frekvenciju, ali ne i za čitav pojas frekvencija koje sadrži čovječji govor. Za takav slučaj morale bi se primijeniti čitave umjetne sprege, kojima bi se izjed-




Slika 36

načile nejednakosti, a to bi bila mjera mnogo teža i neekonomičnija nego gore opisano mjestimično izjednačenje na razmacima koji su mali u odnosu prema duljinama vala titranja koja dolaze u obzir. Ako razmak točaka izjednačenja iznosi 2 km, onda je pogriješka koju izazivaju razlike u fazama samo 5—10 $\mu\mu F$.

Struje koje izazivaju ukrsno preslušavanje prolaze do aparata $B$ puteve iste duljine. One, dakle, dolaze sa istim odnosom faza sa kojim su pošle od aparata $S$, pod pretpostavkom da su njihove fazne brzine na obadvije linije iste, t. j. da obadvije linije imaju iste električne osobine, kao na pr. faktične linije jedne četvorke. U ovom slučaju zbrajaju se djelovanja pojedinih sprega na jednostavan način. Ako je, naprotiv, u jednom Pupinovom kabelu na pr. linija sa koje se smetnja prenosi fantomni krug, a linija na koju se smetnja prenosi jedan od dva prava kruga, to je, zbog općenito veće frekvencije fantomnog kruga, njegova konstanta duljine vala $\alpha_0$ za jednu određenu frekvenciju ispod $f_0$ po jedn. 37 manja od konstante

stvarnog kruga. Zbog toga je po odjeljku 3 fazna brzina u fantomnom krugu veća a vrijeme faznog pomaka manje za istu duljinu puta. To znači, da dijelovi struje, koji prolaze kroz kondenzatore bliže aparatu *B* i koji najprije protječu fantomnim krugom, imaju vrijeme faznog pomicanja kraće nego oni dijelovi koji prolaze kroz kondenzatore bliže aparatu *S*, koji prvenstveno teku stvarnim krugom na koji se prenosi preslušavanje. Ako su obadvije linije različnoga tipa, onda se djelovanja sprega ukrsnog preslušavanja ne zbrajaju jednostavno, već pojedini dijelovi izmjenične struje. određene frekvencije, koja izaziva preslušavanje dolaze ponovno u aparat *B* sa nešto izmijenjenim uzajamnim odnosom faza. Prema tome, i ukrsno preslušavanje moglo bi se samo približno izjednačiti pomoću dopunskih kondenzatora koji bi se postavili jedino na mjestu gdje se preslušavanje opaža.

Ali, pošto se kod ukrsnog preslušavanja djelovanja pojedinačnih sprega otprilike zbrajaju to je za ovaj slučaj sistematska nesimetrija izolacije ili predenja naročito nezgodna, pošto sprege, koje uslijed njih nastaju imadu u prvom redu isti predznak. Izjednačenje eventualnih sprega ukrsnog preslušavanja pomoću ukrštavanja (u svojoj četvorci), pa i na većim razmacima, korisno je, kad se faze pojedinih struja, koje prolaze kroz sprege, ne razlikuju znatno.

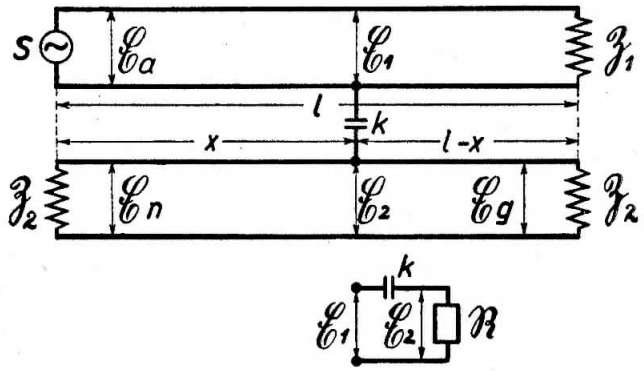
Ako primijenimo ranije opisanu metodu izjednačenja pomoću kondenzatora i to tako da vodimo računa samo o otklanjanju sporednog preslušavanja, to će u svakoj sekciji kabela preostati izvjesne sprege ukrsnog preslušavanja, koje će zbrojene moći dati dovoljno velike vrijednosti da prouzrokuju smetnje, ako ima sistematskih nesimetrija. Točan račun pokazuje, da će ove sprege biti najmanje, kad se kondenzatori za izjednačenje umetnu otprilike u sredini sekcije.

Interesantan bi bio odgovor na pitanje: kolika je vrijednost gušenja preslušavanja izazvanog spregama preslušavanja u kabelu? Odgovor je prilično jednostavan za teoretski slučaj jednog jedinog mjesta sprege između dva inače potpuno nespregnuta strujna kruga. Odgovor se može dati i računski, ako se pretpostavi da su sprege podijeljene potpuno ravnomjerno u svim sekcijama. Prvi slučaj imamo onda kad imamo u inače odličnom kabelu jedno mjesto smetnje; drugi slučaj grubo odgovara jednom međugradskom kabelu brižljivo izjednačenom sa jednom određenom točnošću (prvo, jer se predznaci zaostalih sprega preslušavanja mijenjaju nepravilno a drugo, što ima veći broj zaostalih sprega koje se nalaze ispod utvrđene granice). Jednim točnim računom ne mogu se obuhvatiti



stvarne prilike sa nepravilnim nizom slučajnih pozitivnih i negativnih sprega raznih veličina.

Gušenje preslušavanja označuje se odnosom $b_n = \ln \frac{E_a}{E_n}$ (odnos vrijednosti sl. 37) gdje $\mathfrak{E}_a$ i $\mathfrak{E}_n$ znače izmjenične napone na odgovarajućim krajevima dva strujna kruga, za koja se prije svega pretpostavlja da su homogena. Ali ipak, slijedeća opća razmatranja vrijede i za pupinizirane linije. Konstante rasprostiranja ovih strujnih krugova su $\gamma_1$ i $\gamma_2$, njihovi valni otpori $\mathfrak{Z}_1$ i $\mathfrak{Z}_2$, oba strujna kruga neka su na krajevima zatvorena prividnim otporima koji su jednaki valnim otporima, za ćim se u praksi uvijek teži. Rezultat našeg raz-




Slika 37

matranja neće se bitno izmijeniti iako gornji uslovi nisu baš točno ispunjeni.

U udaljenosti *x* km od početka kabela neka se nalazi jedna sprega k; na tom mjestu vlada napon $\mathfrak{E}_1$ u krugu koji stvara smetnju, a napon $\mathfrak{E}_2$ prouzrokavan spregom u krugu u kojem se smetnja osjeća. Tada će biti:

$$\mathfrak{E}_1 = \mathfrak{E}_a \cdot e^{-\gamma_1 x}, \tag{85}$$

$$\mathfrak{E}_n = \mathfrak{E}_2 \cdot e^{-\gamma_2 x}. \tag{86}$$

Prema sl. 37 dolje iznosi ukupna struja koja na mjestu sprege teče u liniju na kojoj se smetnja osjeća

$$\mathfrak{J}_2 = \frac{\mathfrak{E}_1}{\frac{1}{j\omega k} + \mathfrak{R}}, \tag{87}$$

Prividni otpor ove linije na spomenutom mjestu iznosi $\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{Z}_2}{2}$.

pošto se ona sastoji iz dva paralelno vezana dijela, lijevog i desnog. Pad napona na prividnom otporu jednak je naponu $\mathfrak{E}_2$:

$$\mathfrak{E}_2 = \mathfrak{J}_2 \cdot \mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{E}_1}{\frac{1}{j\omega k} + \frac{\mathfrak{Z}_2}{2}} \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2}{2} = \mathfrak{E}_1 \cdot \frac{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2}{2 + j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2} \approx \mathfrak{E}_1 \cdot \frac{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2}{2}, \quad (88)$$

pošto je $k$ malo to je $j\omega k.\mathfrak{Z}_2 \ll 2$ i kao takvo zanemareno u odnosu prema 2. Prema tome je:

$$\mathfrak{E}_n \approx \mathfrak{E}_1 \cdot \frac{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2}{2} \cdot e^{-\gamma_2 x} \text{ (jedn. 86)}$$

$$= \mathfrak{E}_a \cdot \frac{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2}{2} e^{-(\gamma_1+\gamma_2)x} \text{ (jedn. 85.)}$$

$$\frac{\mathfrak{E}_a}{\mathfrak{E}_n} \approx \frac{2}{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2} \cdot e^{(\gamma_1+\gamma)x_2}. \quad (89)$$

Odnos vrijednosti će biti:

$$\frac{E_a}{E_n} \approx \frac{2}{\omega k \cdot Z_2} \cdot e^{(\beta_1+\beta_2)x}. \quad (90)$$

Dakle:

$$b_n \approx \ln\left(\frac{2}{\omega k \cdot Z_2} \cdot e^{(\beta_1+\beta_2)x}\right) = (\beta_1+\beta_2)\,x + \ln\frac{2}{\omega k \cdot Z_2}. \quad (91)$$

Prvi zbroj na desnoj strani jednadžbe otpada za $x = 0$, t. j. kad se mjesto smetnje nalazi na početku linije. U ovome najnepovoljnijem slučaju biti će:

$$b_n \approx \ln\frac{2}{\omega k \cdot Z_2}. \quad (92)$$

Ako k izrazimo u $\mu\mu F$ onda treba razlomak pomnožiti sa $10^{12}$:

$$b_n \approx \ln\frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k \cdot Z_2}. \quad (93)$$

Za slučaj preslušavanja između dva stvarna kruga jedne četvorke treba ovdje metnuti $k = \frac{k_1}{4}$ a za preslušavanje između stvarnog kruga i fantomnog $k = \frac{k_2}{2}$ odn. $\frac{k_3}{2}$ a u slučaju nesimetrije otpora ili samoindukcije, odn. odgovarajuće vrijednosti sprege $k_r$ odn. $k$ (sravniti sl. 31 i 32)



Ako na pr. kod preslušavanja između stvarnog i fantomnog kruga ona imaju različne valne otpore $Z_{St}$ i $Z_V$ to će nastati različni odnosi napona prema tome: da li se mjeri utjecaj fantomnog kruga na stvarni ili obrnuto. U prvom će slučaju biti:

$$b_{nSt} \approx \ln\frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k \cdot Z_{St}} = \ln(2 \cdot 10^{12}) - \ln(\omega k) - \ln Z_{St}$$
$$= [28{,}3 - \ln(\omega k)] - \ln Z_{St}, \quad (94)$$

U drugom slučaju biti će:

$$b_{nV} \approx \ln\frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k \cdot Z_V} = [28{,}3 - \ln(\omega k)] - \ln Z_V. \quad (95)$$

Obadva gušenja preslušavanja razlikuju se za jedan određeni tip linije za određenu vrijednost od

$$\Delta b_n = b_{nV} - b_{nSt} = \ln Z_{St} - \ln Z_V \ln = \frac{Z_{St}}{Z_V} \sim \ln 2 \approx 0{,}7 \text{ Nepera.} \quad (96)$$

Iz praktičnih razloga mjeri se većinom utjecaj stvarnog kruga na fantomni (sl. 22) pošto se zna, da obrnuti utjecaj daje za $\Delta b \approx 0.7$ Nepera nepovoljnije vrijednosti gušenja. Odnos energije određuje se srednjom algebarskom vrijednosti između $b_{nV}$ i $b_{Stn}$. Tako dobiveni broj smatra se kao gušenje preslušavanja između stvarnog i fantomnog kruga:

$$b_n = b_{nV} - \frac{1}{2} \cdot \ln\frac{Z_{St}}{Z} \approx \ln\frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k \cdot Z_V} - \ln\sqrt{\frac{Z_{St}}{Z_V}} \text{ (jedn. 95)} \quad (97)$$

$$= \ln\left(\frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k \cdot Z_V}\sqrt{\frac{Z_V}{Z_{St}}}\right) = \ln\frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k\sqrt{Z_{St} \cdot Z_V}} \approx b_{nV} - 0{,}35 \text{ Nepera.}$$

Formula 93 (vrlo sigurna) koristi kod ocjenjivanja najnepovoljnije vrijednoti preslušavanja $b_{n_{\min}}$ koja može da nastane u pupiniziranoj liniji uslijed maksimalne sprege $k_{\max}$ kad se ona u jednom nepovoljnom slučaju nalazi baš na početku linije:

$$b_{n_{\min}} \approx \ln\frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k_{\max} \cdot Z_2}. \quad (98)$$

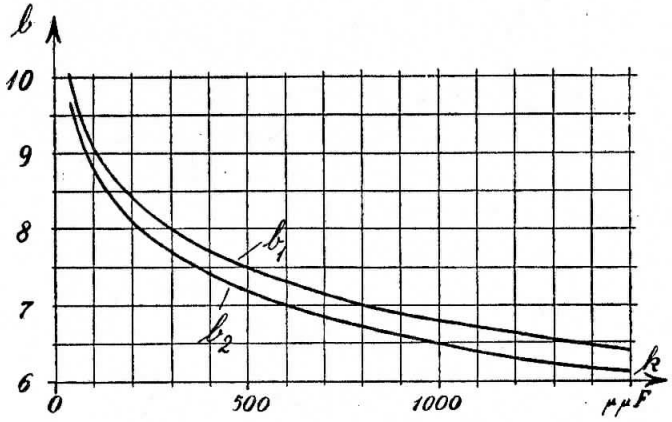
Drugi slučaj koji treba promatrati jeste onaj, kad se u svakoj sekciji javlja ista sprega $k_0$ (u $\mu\mu F$) sa istim predznakom. Za ovakav slučaj daje viša matematika za linije istoga tipa slijedeći rezultat:

$$b_n \approx \ln\frac{4 \cdot 10^{12}}{\omega k_0 \cdot Z_2}. \quad (99)$$

Detaljnija računanja pod pretpostavkom različitog rasporeda sprega u pojedinim sekcijama upućuju na to, da se, ako postoji srednja sprega $k_m$ za svaku sekciju, ne uzima jedn. 99 za računanje srednje vrijednosti gušenja preslušavanja $b_n$, već da se radi sigurnosti, uzme jednadžba 93 i da joj se doda jedan korekcioni član $\Delta' b_n$ kojim se uzima u obzir pogoršanje preslušavanja sa povećanjem duljine linije:

$$b_{n_m} \approx \ln \frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k_m \cdot Z_2} - \Delta b'_n, \qquad \Delta b'_n = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - e^{2(\beta_{o_1} + \beta_{o_2})}}{1 - e^{2(b_1 + b_2)}} \qquad (100)$$

Ovdje znači $\beta_{01}$ gušenje kabela između dvije Pupinove ovojnice a $b_1$ ukupno gušenje kruga sa kojeg se preslušavanje prenosi a $\beta_{02}$




Slika 38

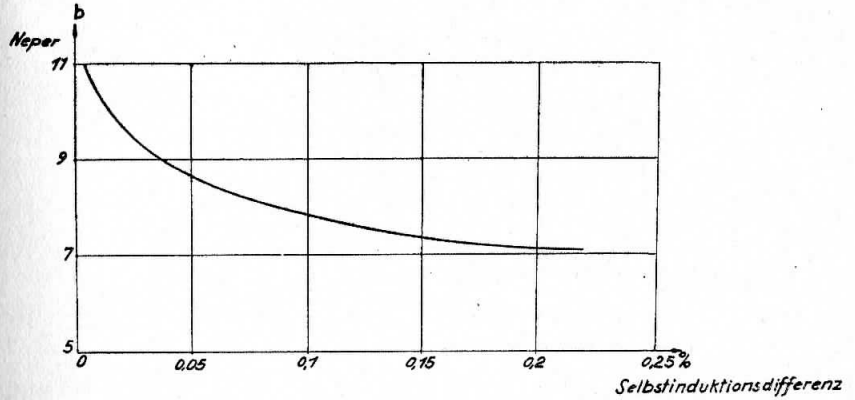
i $b_2$ odgovarajuće vrijednosti kruga na koji se preslušavanje prenosi.

Ako se dio kabela između dvije ovojnice (jedna sekcija kabela) sastoji iz $n$ pojedinačnih duljina to prema jednom već ranije primijenjenom zakonu vjerojatnosti, srednja izmjerena sprega za svaku duljinu kabela smije iznositi najviše $k_1 = \frac{k_m}{\sqrt{n}}$ pa da se pri svojevoljnom nastavljanju dijelova kabela ne pređe srednja vrijednost sprege $k_m$ sekcije kabela.

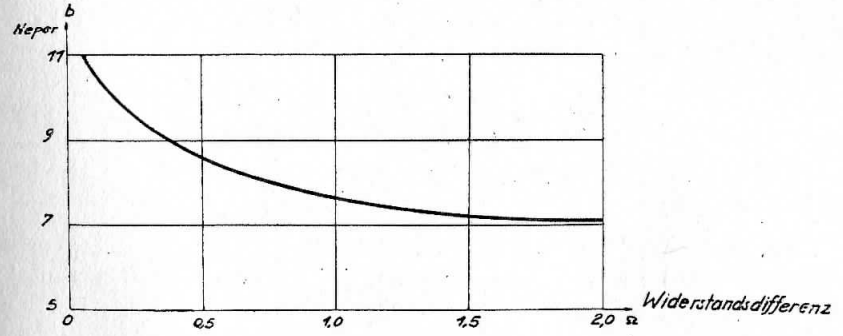
Za normalni Pupinov kabel i za titranja, čija se frekvencija ne razlikuje mnogo od frekvencije kojom se mjeri, dobivamo krivulje izražene na slici 38, koje pokazuju zavisnost preslušavanja od sprege (minimalno gušenje za najveću spregu na početku linije, odn. srednje gušenje za srednje sekcije). Krivulja $b_1$, vrijedi za preslušavanje između dva stvarna kruga jedne četvorke, krivulja $b_2$ za preslušavanje između stvarnog i fantomnog kruga (po jedn. 97). Kao apscisu za $b_1$ treba uzeti neposredno vrijednost $k_1$ za $b_2$ treba uzeti $k_2$ odnosno $k_3$.



Slika 39 prikazuje preslušavanje između stvarnog i fantomnog kruga jednog normalnog ormara sa ovojnicama u ovisnosti o ne-




Slika 39 (Razlika samoindukcija)




Slika 40 (Razlika otpora)

simetriji samoindukcije ovojnice a sl. 40 u ovisnosti o nesimetriji otpora ovojnica.

Grupe ovojnica izazivaju preslušavanja, kao što smo vidjeli, zbog razlike kapaciteta kao i zbog nesimetrija otpora i samoindukcija.

Mjesto da se mjerenja vrše pojedinačno, često je dovoljno da se mjerenje vrši na grupama ovojnica (koje su završene omskim otporima, kakvi otprilike odgovaraju saobraćajnim okolnostima).

U tom se slučaju zahtijeva, da preslušavanje između dva po volji izabrana kruga u montiranom ormaru sa ovojnicama iznosi najmanje $b = 9{,}5$ Nepera.

Za ukrsno preslušavanje dobiva se prema slici 37 slijedeće:

$$\mathfrak{E}_g = \mathfrak{E}_2 \cdot e^{-\gamma_2 (l-x)}, \tag{101}$$

U ovoj jednadžbi $l$ znači ukupnu duljinu kabela u km. Sa jednadžbom 88 ćemo dobiti dakle:

$$\mathfrak{E}_g \approx \mathfrak{E}_1 \cdot \frac{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2}{2} e^{-\gamma_2 (l-x)} = \mathfrak{E}_a \cdot \frac{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2}{2} \cdot e^{-\gamma_1 x - \gamma_2 (l-x)} \text{ (jedn. 85)}$$

$$= \mathfrak{E}_a \cdot \frac{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2}{2} \cdot e^{-(\gamma_1 - \gamma_2) x - \gamma_2 l},$$

$$\frac{\mathfrak{E}_a}{\mathfrak{E}_g} \approx \frac{2}{j\omega k \cdot \mathfrak{Z}_2} e^{(\gamma_1 - \gamma_2) x + \gamma_2 l}. \tag{102}$$

Kao odnos vrijednosti dobiva se:

$$\frac{E_a}{E_g} \approx \frac{2}{\omega k \cdot Z_2} \cdot e^{(\beta_1 - \beta_2) x + \beta_2 l}, \tag{103}$$

$$b_g \approx \ln \left( \frac{2}{\omega k \cdot Z_2} \cdot e^{(\beta_1 - \beta_2) x + \beta_2 l} \right) = [(\beta_1 - \beta_2) x + \beta_2 l] + \ln \frac{2}{\omega k \cdot Z_2} \tag{104}$$

Gušenje ukrsnog preslušavanja među linijama istoga tipa ($\beta_1 = \beta_2$), koje prouzrokuje jedna jedina sprega, nezavisno je od mjesta ove sprege:

$$b_g \approx \beta_2 l + \ln \frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k \cdot Z_2} = b + \ln \frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega k \cdot Z_2} \tag{105}$$

ako $k$ izrazimo u μμF a ukupno gušenje međugradske linije stavimo da je $\beta_2 \, l = b$.

Pošto se, kao što smo gore vidjeli, sve sprege ukrsnog preslušavanja između linija istoga tipa zbrajaju, dobiti ćemo u slučaju kad ima više sprega:

$$b_g \approx b + \ln \frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega (k_1 + k_2 + k_3 \ldots) \cdot Z_2}. \tag{106}$$

Ako se jedna linija sastoji iz $n$ sekcija koje imaju jednake sprege $k_0$ sa istim predznakom dobiti ćemo da je:

$$b_g \approx b + \ln \frac{2 \cdot 10^{12}}{\omega (n k_0) \cdot Z_2}. \tag{107}$$

Sad vidimo i pomoću računa, da su sistematske pogriješke u izolaciji i predenju, koje izazivaju sprege prvobitno istog predznaka, naročito opasne za ukrsno preslušavanje.



Između vodova susjednih četvorka postoje kapaciteti i kapacitetne razlike. Same vrijednosti kapaciteta, pa prema tome i njihove razlike u opće su manje nego kod jedne četvorke, u slučaju kad su susjedne četvorke izrađene sa suprotnim pravcima predenja i različnim hodovima. Radi toga, makar su zahtjevi u pogledu otklanjanja preslušavanja visoki, potrebno je da se izjednačenje ovih kapacitetnih razlika izvrši samo u malom broju kombinacija koje dolaze u obzir. Razmišljanja koja se tu primijenjuju pridružuju se dijelom onima koja se odnose na preslušavanje između dva stvarna kruga jedne četvorke (kad nema nikakvih zajedničkih puteva struje) a dijelom onima koja se odnose na preslušavanje između stvarnog kruga i fantomnog (u izvjesnim slučajevima različni valni otpori i konstante rasprostiranja). Izjednačenje susjednih četvorka vrši se uvijek prije event. izjednačenja prema zemlji (odjeljak 7) i izjednačenja preslušavanja u četvorci. U metodi izjednačenja pomoću križanja ne vodi se računa o nejednakostima kapaciteta izvan četvorka pošto se međusobni red četvorka mijenja na svakom mjestu križanja uslijed čega dvije četvorke nikad ne ostaju u neposrednoj blizini na većoj duljini. Ako se u tom slučaju pojave smetnje uslijed preslušavanja, one se sastoje od neodređenih šumova sastavljenih iz mnogih govora koji se preslušavaju.

## 6. SMETNJE USLIJED JAKIH STRUJA

Telefonske linije, koje su prema zemlji dobro izolirane i koje na većoj duljini leže u blizini, i paralelno s linijama visokog napona, mogu dobiti tako visoke potencijale, da je opasan po život svaki dodir sa njima ili sa metalnim dijelovima aparata koji su u električnoj vezi s tima telef. linijama. Opasnost pada prilično brzo u koliko se povećava udaljenost od vodova jakih struja. Napon naboja $E_0$ nezavisan od frekvencije, pada otprilike sa kvadratom udaljenosti, kad je ona velika u odnosu prema visini iznad zemlje električnih i telefonskih vodova. Za praktične potrebe formula za jednožične vodove približno točno glasi:

$$E_0 = \frac{12}{x^2} \cdot E \tag{108}$$

Ovdje je $E$ napon jake struje a $x$ razmak linija u m. Uzmimo kao primjer jednofaznu izmjeničnu struju od 16500 V i paralelnu

telefonsku liniju u razmaku od 100 m. U tom slučaju iznositi će efektivni napon naboja $E_0 \approx \frac{12}{100^2} \cdot 16.500 \approx 20$ V, dok bi telefo linije, koje bi išle sasvim blizo, mogle primati više hiljada volta. Ako je telefonska linija vezana sa zemljom javit će se struja nabijanja $\mathfrak{J}_0$, koja je nezavisna o veličini otpora zemlje $R$ i jednaka $j\omega C \cdot \mathfrak{E}_0$, sve dotle dok je $R$ zanemarljivo malo prema prividnom otporu $\frac{1}{j\omega C}$ kapaciteta $C$ između linije za jaku struju i telefonske linije. Ovaj otpor iznosi uopće više miliona Oma. Imamo, naime, jedan strujni krug sa otporima $\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)$ koji su u red vezani i u kojem djeluje napon $\mathfrak{E}_0$. Struja punjenja proporcionalna je kapacitetu između obiju linija i frekvenciji visokog napona. Prema tome lakše prolaze harmonična titranja visokog napona, koja leže u oblasti govornih frekvencija i koja se poglavito proizvode na kolektorima i žljebovima generatora i motora. Ona izazivaju šumove u slušalici i mogu onemogućiti svako sporazumijevanje.

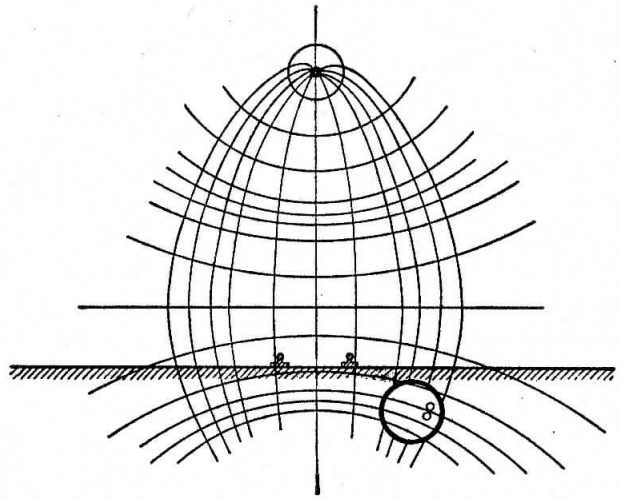
U pogledu smetnja koje proizvode šumovi svejedno je da li oni potječu od vodova izmjenične ili istosmjerne struje, jer se i kod mašina za istosmjernu struju stvaraju na kolektorima titranja viših frekvencija. Ovaj pojav je još jači kod istosmjerne struje koja se dobiva u usmjerivačima sa živinom parom.

Napon u točki koja je spojena sa zemljom pada prema zemlji od $E_0$ na $R \cdot I$ $I_0$ ($R$ = otpor zemljovoda). Napon ostalih točaka telefonske linije, koje su udaljene od točke spojene sa zemljom, viši je za neznatni pad napona koji se javlja kod pritjecanja struje punjenja na dijelu linije između promatrane točke i točke spojene sa zemljom.

Kod duplih telefonskih linija govorne struje nisu doduše smetane sve dotle, dok su obadva voda telefonske linije apsolutno simetrična prema vodu jake struje i prema zemlji, ali je moguće da nakon nabijanja telefonske linije dosegne opasnu visinu. Ako jedan vod telefonske linije ima na jednom mjestu veći odvod nego drugi vod, to će jača struja, koja teče na mjestu većega odvoda, izazvati veći pad napona u odnosnom vodu. Potencijali obaju vodova nisu više jednaki, pa u njima nastaje struja izjednačenja, koja će proizvoditi smetnju u aparatima priključenim na krajevima linije. Duple zračne linije, koje su paralelne sa vodovima jake struje izvanredno su osjetljive dakle prema odvodu, a da ne govorimo o induciranim naponima koji često mogu biti opasni po život.



Različni pokušaji sa sredstvima za smanjivanje induciranog napona, na pr. zaklanjanje telefonskih linija od električnog polja voda jake struje pomoću žica paralelno postavljenih sa telefonskim, pokazuju, s obzirom na troškove, neznatan rezultat. Najbolje je sredstvo, da se sve telefonske linije, koje su paralelne sa vodovima jake struje, pomaknu što dalje, ili da se metnu u kablove. Izuzetci su dopušteni samo onda kad telefonske linije idu paralelno sa simetričnim vodovima trofazne struje, koji, ako su u propisnom



Slika 41

stanju, ne prouzrokuju jako vanjsko polje. Čim je pak simetrija vodova jake struje poremećena, na pr. ako je jedna faza na zemlji, rad na paralelnim telefonskim linijama postaje nemoguć.

Naročito su neprijatni pojavi povećanih napona u vodovima trofazne struje koji nastaju uslijed manipulacija prekidanja i uključivanja kad vodovi imaju slučajno dodir sa zemljom. Uslijed toga se javljaju u paralelnim telefonskim linijama odgovarajući visoki naponi prema zemlji. Ako su telefonske linije duple, onda naponi mogu biti tako visoki, da stave u djelovanje osigurače protiv groma koji su udešeni za napone oko 300 Volta. Na žalost ovi osigurači ne djeluju u istom momentu, već uvijek jedan osigurač djeluje za neki dio sekunde prije nego drugi. Posljedica je toga, da se javlja

jedna struja izjednačenja u formi udara, koja teče onim dijelom linije gdje osigurač nije pregorio i kroz aparat. Kod prolaza ove struje kroz slušalicu javlja se oštar prasak koji je naročito neprijatan ako je slušalica čvrsto pritisnuta uz uho. U toku su ispitivanja, da se pomoću gromobranskih osigurača, vezanih između dva voda duple telefonske linije, spriječi dolazak struje izjednačenja u aparate, odnosno da se pomoću gromobrana spojenog sa sredinom pogriješno vezane samoinduktivne ovojnice ova struja odvede u zemlju.

Mnogo povoljnije rezultate dobivamo, kao što je naviješteno, stavljanjem telefonskih linija u kablove. Olovni omot kabela stavljenog u zemlju, koji ima zemljin potencijal, potpuno štiti žice kabela od električnog polja vodova jake struje (sl. 41), ali ne tako potpuno protiv magnetnog polja iako i protiv ovoga predstavlja znatnu zaštitu kao što ćemo kasnije vidjeti.

Kod električne željeznice vodna žica i tračnice odn. zemlja kao povratni vod predstavljaju strujni krug velike površine; njegove magnetske silocrte prolaze kroz susjedne telefonske linije i prouzrokuju u njima inducirane napone, koji rastu sa veličinom induciranog kruga. Zato ni u telefonskim kablovima nije dopuštena upotreba pojedinačnih vodova sa zemljom kao povratnim vodom, jer bi krug u kome se inducira bio velik i primao bi u sebe previše silocrta koje proizvode smetnju. Moguć je samo rad na dobro upredenim parovima.

Struja u troli $\mathfrak{J}_0$ inducira u svima susjednim električnim vodovima elektromotornu silu $\mathfrak{E}_i$, i to kako u tračnicama tako i u kabelskom omotu, njegovoj armaturi i u kabelskim žilama. Ona iznosi:

$$\mathfrak{E}_i = -j\omega M \cdot l \cdot \mathfrak{J}_0, \qquad (109)$$

ako sa $M$ označimo uzajamnu indukciju na kilometar između vodne žice s jedne strane i tračnica, kabelskog omota i kabelskih vodova s druge strane. Pošto se uzajamni razmak između žila u kabelu i omota uvijek može zanemariti u odnosu prema udaljenosti od vodne žice, to je $M$ praktično u obadva slučaja isto. — Inducirana elektromotorna sila proporcionalna je duljini na kojoj telefonske linije idu paralelno sa električnim linijama i frekvenciji izmjenične struje.

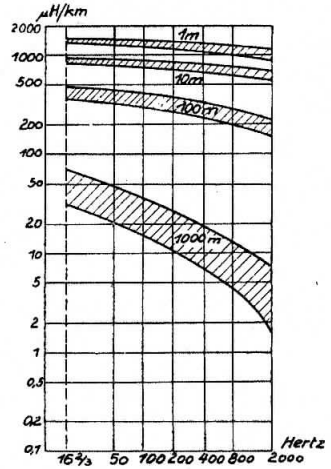
Uzajamna indukcija dvaju strujnih krugova može se točno unaprijed izračunati samo onda, kad su obadva kruga metalno zatvorena, a ne i onda kad se jedan krug (ili, šta više, obadva) sastoji samo od jedne žice i zemlje kao povratnog voda. To dolazi odatle



jer je tok povratnih struja u zemlji neodređen, i zavisan od kakvoće a naročito od vodljivosti zemlje, te prema tome izložen mjesnim i vremenskim kolebanjima. Poznata formula za uzajamnu indukciju dvaju paralelnih vodova sa zemljom kao povratnim vodom:

$$M = 2\left(\ln \frac{2l}{d} - q\right) 10^{-4} \text{ H/km} \qquad (110)$$

pretpostavlja, da je uzajamni razmak $d$ malen prema duljini paralelnosti $l$. Što se tiče veličine $q$ ona ima vrijednost od 0,5 do 5 i



Slika 42

ovisna je o $d$ $l$ i kakvoći zemljišta. Što je $l$ veće to nižu treba uzeti vrijednost za $q$.

Točniji teoretski radovi Breisiga, Rüdenberga i Polačeka pokazali su, da je formula 110 točna samo za istosmjernu struju, a ne i za izmjeničnu. Prema iscrpnim mjerenjima Siemens i Halskea na različnim terenima uzajamna indukcija kod izmjenične struje postaje sve više ovisna o frekvenciji u koliko raste razmak između obadviju linija, i to u tome smislu da $M$ ima to manje vrijednosti što više frekvencija raste (sl. 42). Ovo dolazi odatle, što se povratne struje kroz zemlju sve više približuju dovodnoj liniji u koliko je frekvencija veća, dakle inducirajući krug biva sve manji.

Vodovi u kabelu izolirani su u saobraćaju od zemlje pa primaju inducirane napone prema zemlji, koji mogu dostići neželjenu visinu kad struja u troli postane nenormalno velika, na pr. kad nastane kratki spoj. Stvarni napon prema zemlji manji je od elektromo-

torne sile $\mathfrak{E}_l$ koja se inducira u kabelskoj žili, pošto se on smanjuje uslijed pada napona koji prouzrokuje inducirana struja otječući prema zemlji preko kapaciteta i odvoda. Točno računanje daje kao vrijednost napona prema zemlji na mjestu $x$ kablovske trase $l$ km dugačke koja podleže indukciji*):

*) $\mathfrak{J}_a = \mathfrak{J}_e = 0$. U stacionarnom stanju je:

$$\frac{\partial \mathfrak{E}_x}{\partial x} = (R + j\omega L)\cdot \mathfrak{J}_x + j\omega M \cdot \mathfrak{J}_0 \text{ (jedn. 109)}$$

$$= (R + j\omega L)\left(\mathfrak{J}_x + \frac{j\omega M}{R + j\omega L}\cdot \mathfrak{J}_0\right)$$

$$= (R + j\omega L)\cdot \mathfrak{J}'_x$$

$\frac{\partial \mathfrak{J}_x}{\partial x} = (A + j\omega C)\cdot \mathfrak{E}_x = \frac{\partial \mathfrak{J}'}{\partial x}$; dakle je:

$$\mathfrak{E}_x = \mathfrak{E}_e \cdot \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + \mathfrak{Z}\cdot(\mathfrak{J}_e + \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0)\cdot\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2},$$

$$\mathfrak{J}_x + \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0 = (\mathfrak{J}_e + \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0)\cdot\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + \frac{1}{\mathfrak{Z}}\cdot\mathfrak{E}_e\cdot\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}.$$

Pošto je $\mathfrak{J}_e = 0$:

$$\mathfrak{E}_x = \mathfrak{E}_e \cdot \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + \mathfrak{Z}\cdot\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2},$$

$$\mathfrak{J}_x + \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0 = \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} + \frac{1}{\mathfrak{Z}}\cdot\mathfrak{E}_e\cdot\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2},$$

$$\mathfrak{J}_x = \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} - 1\right) + \frac{1}{\mathfrak{Z}}\cdot\mathfrak{E}_e\cdot\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}.$$

Pošto je: $\mathfrak{J}_a = 0$:

$$0 = \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} - 1\right) + \frac{1}{\mathfrak{Z}}\cdot\mathfrak{E}_e\cdot\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2},$$

$$\mathfrak{E}_e = -\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}\cdot\frac{\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} - 1}{\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2}} = -\mathfrak{Z}\cdot\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\frac{e^{\frac{\gamma l}{2}} - e^{-\frac{\gamma l}{2}}}{e^{\frac{\gamma l}{2}} + e^{-\frac{\gamma l}{2}}}$$

$$\mathfrak{E}_x = \varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}\cdot\left(-\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}\cdot\frac{e^{\frac{\gamma l}{2}} - e^{-\frac{\gamma l}{2}}}{e^{\frac{\gamma l}{2}} + e^{-\frac{\gamma l}{2}}} + \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}\right).$$



$$\mathfrak{E}_x = -\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}\cdot\frac{e^{\gamma\left(\frac{l}{2}-x\right)} - e^{-\gamma\left(\frac{l}{2}-x\right)}}{e^{\gamma\frac{l}{2}} + e^{-\gamma\frac{l}{2}}}, \tag{111}$$

gdje je $\varkappa = \frac{j\omega M}{R + j\omega L}$ a sve vrijednosti se odnose na strujni krug koji sačinjavaju jedna kablovska linija i zemlja kao povratni vod izvedena pomoću odvoda i kapaciteta prema zemlji. Dakle biti će na kraju uplivisanog kruga ($x = 0$):

$$\mathfrak{E}_e = -\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}\cdot\frac{e^{\frac{\gamma l}{2}} - e^{-\frac{\gamma l}{1}}}{e^{\frac{\gamma l}{2}} + e^{-\frac{\gamma l}{2}}}, \tag{112}$$

na početku linije ($x = l$):

$$\mathfrak{E}_a = -\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}\cdot\frac{e^{-\frac{\gamma l}{2}} - e^{\frac{\gamma l}{2}}}{e^{\frac{\gamma l}{2}} + e^{-\frac{\gamma l}{2}}} = -\mathfrak{E}_e \tag{113}$$

i u sredini $\left(x = \frac{l}{2}\right)$:

$$\mathfrak{E}_m = -\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}\cdot\frac{e^0 - e^0}{e^{\frac{\gamma l}{2}} + e^{-\frac{\gamma l}{2}}} = 0. \tag{114}$$

Dakle, u sredini jedne linije izolirane od zemlje, na koju se vrši indukcija sa isto toliko duge paralelne linije jake struje, vlada potencijal zemlje, a oba kraja linije imaju jednake potencijale prema zemlji ali u svakom trenutku suprotno označene. Između oba kraja linije vlada dvostruki napon $\mathfrak{E}_{e-a} = 2\,\mathfrak{E}_e = -2\,\mathfrak{E}_a$.

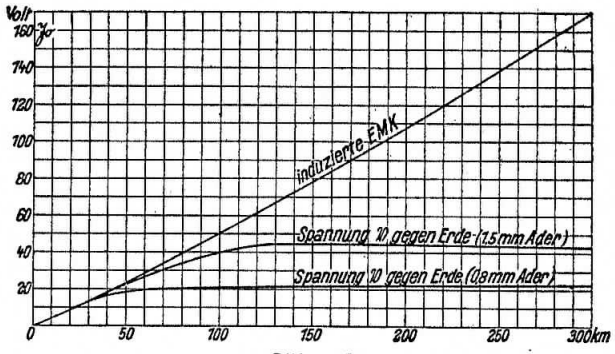
Ako telefonska linija dobije na jednom kraju zemlju, to će silom prilika taj kraj imati potencijal zemlje. Raspored napona uzduž linije ostaje isti, dakle drugi kraj linije imati će dvostruki napon prema zemlji $\mathfrak{E}_{e-a}$.

Kod duljih linija može se $e^{-\frac{\gamma l}{2}}$ zanemariti prema $e^{\frac{\gamma l}{2}}$ pa ćemo dobiti:

$$\mathfrak{E}_{a-e} = 2\,\mathfrak{E}_e = -2\,\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}\cdot\frac{e^{\frac{\gamma l}{2}}}{e^{\frac{\gamma l}{2}}} = -2\,\varkappa\cdot\mathfrak{J}_0\cdot\mathfrak{Z}. \tag{115}$$

Dakle u koliko $l$ raste napon prema zemlji približuje se jednoj graničnoj vrijednosti koja je neovisna o duljini.

Polazeći od ove duljine, spomenuti pad napona koji nastaje na liniji uslijed indukcione struje koja otječe ka zemlji, potpuno kompenzira dalji porast napona prema zemlji. Slika 43 pokazuje indukcione napone prema zemlji na kraju običnih kablovskih vodova, promjera 0,8 i 1,5 mm, čiji je drugi kraj vezan sa zemljom, a uslijed struje u troli jednofazne izmjenične struje uobičajene frekvencije $16^2/_3$ Herca. Ti naponi dostižu praktično svoju najveću vrijednost ako duljina paralelnosti iznosi okruglo 130 km. Kod pupiniziranih vodova granične duljine su nešto veće. Pošto $\gamma$ raste kad raste broj perioda, biti će, za harmonična titranja struje u troli, koja leže u oblasti govornih frekvencija, granična duljina od koje



Slika 43

su idući prema gore naponi prema zemlji nezavisni od duljine paralelnosti, tako brzo dostignuta, da se visina induciranih napona govornih frekvencija može smatrati praktično nezavisna od duljine paralelnosti kod običnih kablova. Kod Pupinovih kablova odnosi su zapleteniji; krivulje napona teku do postignuća granične duljine u oscilacijama koje jako opadaju.

Sredstva za smanjivanje utjecaja linija visokog napona na paralelne telefonske kablove mogu se primijeniti kako kod uređaja jake struje tako i kod uređaja slabe struje. Konstruktor električnih strojeva ima prije svega zadatak da reducira kod generatora i motora harmonična titranja struje u oblasti govornih frekvencija, jer ona naročito smetaju sporazumijevanje na susjednim telefonskim linijama. To se može postići manjom zasićenošću zuba (u koliko to dopušta ekonomsko iskorišćenje strojeva), zatim izbjegavanjem da odnos između broja zareza na statoru i rotoru bude cio broj, dalje pomoću kosih zareza i t. d. Potrebno je, dalje, da se ograniči visina



struja pri kratkom spoju pomoću razmjerno visokog prividnog otpora generatora. Transformatori, koji se nalaze u centralama i podstanicama, djeluju također prigušno na struje pri kratkom spoju; ima već konstrukcija koje poslije jedne periode prave prekid.

Kod električnih željeznica u Njemačkoj razmaci između podstanica iznose obično 60—70 km. Svaka podstanica napaja u obadva pravca, vodna žica je razdvojena većinom u sredini između dviju podstanica. Duljine strujnih krugova sa kojih se vrši indukcija iznose u najnepovoljnijem slučaju, kad se lokomotiva nalazi u sredini između podstanica, 30—35 km. Najveća indukcija može se očekivati u slučaju kratkog spoja, koji je naročito neprijatan kad se kratki spoj dogodi blizo sredine između dvije podstanice. Ako efektivna jakost struje u slučaju kratkog spoja iznosi okruglo 700 Ampera u tom slučaju računamo sa 700 (30 do 35) 20—25.000 inducirajućih »amperkilometara« (Akm). Ako je kratki spoj bliže podstanici onda je jakost struje pri kratkom spoju veća uslijed manjeg otpora kruga, ali nije obrnuto proporcionalna udaljenosti od podstanice, budući da je ta jakost ograničena i drugim okolnostima kao što je to već naviješteno. Kratki spoj u sredini razmaka između podstanica predstavlja zaista najnepovoljniji slučaj.

Često se vodna žica između podstanica ne prekida već se lokomotiva napaja sa obje strane. Ako su obadva dijela struje napajanja, koja dolaze u lokomotivu sa suprotnih strana, obrnuto proporcionalna otporima vodne žice, t. j. udaljenostima od podstanica, to su anperkilometri (Akm) koji vrše indukciju u susjednoj telefonskoj liniji, nezavisno od položaja lokomotive, uvijek međusobno suprotno jednaki i njihova se indukciona djelovanja ukidaju. Praktično je teško, napone obadviju podstanica održati na istoj visini da bude ispunjen gornji uslov. Uslijed nejednakih napona vodnom žicom protječu struje izjednačenja koje vrše indukciju na susjednim telefonskim linijama. Napokon nije moguće postići, u slučaju kratkog spoja, da relea za maksimalnu struju načine prekid istovremeno u obadvije podstanice. Ako se kratki spoj dogodi u blizini jedne podstanice te rele u toj stanici prije načini prekid, to prije nego djeluje rele u drugoj podstanici, cjelokupna struja, uslijed kratkog spoja, teče u krugu čija je duljina skoro jednaka razmaku podstanica. U tome osobito važnom slučaju kratkog spoja moramo računati sa dva puta većom duljinom kruga nego u slučaju kad je vodna žica razdvojena u sredini između podstanica.

Prema gornjim razlaganjima mogli bi se očekivati vrlo visoki inducirani naponi u telefonskim linijama koje u maloj udaljenosti

idu paralelno sa električnom željeznicom. Na sreću, kao što ćemo odmah vidjeti, svi drugi metalni vodovi koji leže paralelno sa električnom vodnom žicom, a prije svega šinje, olovni omot kabela i njegova armatura vrše kompenzaciono djelovanje, koje se raznim pomoćnim mjerama može još povećati.

Kod električne željeznice dijeli se struja, koja je u lokomotivskom motoru izvršila koristan rad, na dva dijela: jedan se vraća u centralu a drugi teče dalje po šinjama. Obadva prelaze u zemlju i skupe se opet tek u neposrednoj blizini centrale. Kolosjek za ove struje predstavlja jedan veliki zemljovod, koji im omogućava brži prelaz u zemlju. Obadva dijela struje koji teku šinjama imaju suprotan smijer, te se njihovo indukciono djelovanje na paralelne telefonske linije skoro poništava.

Gore smo spomenuli, da struja u vodnoj žici električne željeznice izaziva u metalnim šinjama osim toga i induciranu struju, koja se zatvara preko vodivog zemljišta. Ova je struja praktično konstantna na cijeloj duljini kruga (od centrale do lokomotive) što nije slučaj kod povratne struje u šinjama. Ovo se može i teoretski dokazati. Da se radi o čisto induciranoj struji dokaz je u tome, što se to ne događa kod trajne istosmjerne struje. Ako je $M_s$ uzajamna indukcija na kilometar između vodne žice i šinje, to će inducirani napon u šinjama, koji zaostaje za strujom u troli $\mathfrak{J}_0$ za okruglo 90°, iznositi prema jedn. 109:

$$\mathfrak{E}_{i_s} = -j\omega M_s \cdot l \cdot \mathfrak{J}_0 \qquad (116)$$

a inducirana struja u šinji biti će:

$$\mathfrak{J}_s = \frac{\mathfrak{E}_{i_s}}{(R_s + j\omega L_s) \cdot l} = -\frac{j\omega M_s}{R_s + j\omega L_s} \cdot \mathfrak{J}_0 = -k\mathfrak{J}_0, \qquad (117)$$

ako sa $R_s$ i $L_s$ označimo otpor i samoindukciju šinje spojene sa zemljom a za 1 km duljine.

Da se kompenzaciono djelovanje inducirane struje u šinjama $\mathfrak{J}_s$ jednostavno objasnilo zgodno je, da se po načinu profesora Pleijela (Stockholm) pretpostavi, da je struja, u troli podijeljena u dva dijela $k\mathfrak{J}_0$ i $(1-k)\,\mathfrak{J}_0$. Za prvi dio predstavljaju vodna žica i šinje na neki način duplu liniju, u kojoj je vodna žica dovodni vod, a šinje povratni vod. Napon koji se inducira sa ove duple linije na susjednu telefonsku liniju, neznatan je i jednak je nuli kad su razmaci telefonske linije od vodne žice i od šinja jednaki. Prije svega inducirajući djeluje dio struje $(1-k)\,\mathfrak{J}_0$, za koju zemlja predstavlja jako razgranat povratni vod. Ovim dijelom struje vodna žica elek-



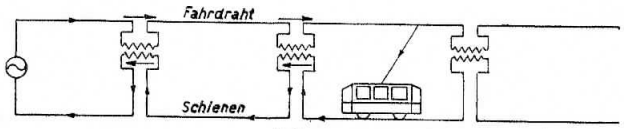
trične željeznice djeluje inducirajući kao jednostavan vod na paralelne telefonske linije.

Ovu indukciju smanjiti ćemo povećanjem neškodljivog dijela struje t. j. inducirane struje u šinji $k\mathfrak{J}_0$, što se postiže povećanjem $M_s$ i smanjivanjem $R_s$. Na pr. kod električnih željeznica sa duplim kolosjekom, uslijed manjeg otpora šinja, inducirani naponi u susjednim telefonskim linijama manji su za oko 15% nego kod jednostrukog kolosjeka. Glavni dio otpora šinja nalazi se na sastavcima, zbog čega se šinje kadkada spajaju pomoću bakrenih spojnica, čime se postiže smanjenje induciranih napona u susjednim telefonskim linijama za iznos oko 40%, ako su jakosti struja u troli slabije. No otpor na sastavcima šinja jako je ovisan o intenzitetu struje i to tako, da otpor pada kad jakost struje raste. U slučaju kratkog spoja otpor je tako neznatan, da inducirana struja u šinjama ima istu vrijednost, kao kad su primijenjene bakrene spojnice. Stoga se u novije vrijeme ove spojnice rijetko primjenjuju. — Uzajamna indukcija između vodne žice i šinja može se izvanredno povećati spregom njihovom pomoću »usisavajućih transformatora«. Primarni namotaj ovih transformatora uključi se u vodnu žicu a sekundarni u šinju (sl. 44). Ovi transformatori približuju faznu razliku struja u vodnoj žici i šinji najpovoljnijoj vrijednosti od 180°. Na svaki je način teško održati besprikornu izolaciju na mjestu gdje je ukopčan sekundarni namotaj u šinju; naročito pri vlažnom vremenu javljaju se jaki odvodi na sekundarnom namotaju uslijed vlažnog zemljišta. Takvi transformatori za usisavanje moraju se umetnuti na malim razmacima, pošto struja u šinji, kao što je gore spomenuto, neprestano teče u zemlju. Kad se ovi transformatori ugrađuju u šinje moraju se naravno, predvidjeti i spojnice na nastavcima gdje nema transformatora. Na električnoj željezničkoj pruzi Oslo—Drammen (u Norveškoj) uspjelo je, pomoću usisavajućih transformatora umetnutih na razmacima od 1.5 km, 96% struje u troli koncentrirati u šinjama.

Još povoljniji rezultati dobivaju se kad se uza šinju upotrijebi kao povratni vod jedan poseban vod postavljen blizo vodne žice, te se na taj način dobije jedan razmjerno mali inducirajući krug. Vodna žica i povratni vod opet se spregnu po sl. 45 pomoću usisavajućih transformatora. Povratni vod, kroz koji teče struja približne jakosti kao i u vodnoj žici, mora se na odgovarajući način dovoljno jako dimenzionirati. Švedska uprava državnih željeznica postigla je izvanredne rezultate ovim, na svaki način skupim postupkom. Te-

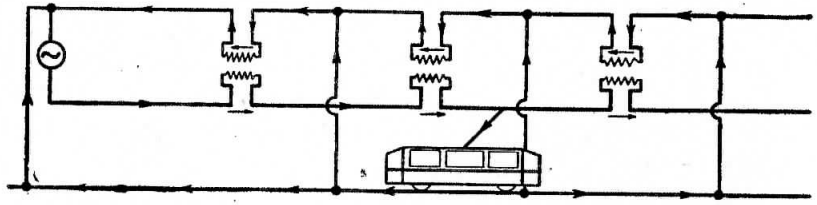
lefonske linije na 50 met. od kolosjeka pokazuju induciranu elektromotornu silu od samo 0,02 Volta za 100 Akm. Ako paralelnost trasa iznosi 30 km a jakost struje pri kratkom spoju 700 A iznositi će inducirana elektromotorna sila svega $0{,}02 \frac{700 \cdot 30}{100} = 4{,}2$ Volta.

Usisavajući transformatori, naročito sa posebnim povratnim vodom, predstavljaju jedno prilično skupocjeno sredstvo za smanjivanje induciranih napona u susjednim telefonskim linijama, ali ima-



Slika 44

ju tu prednost, da su od koristi za koji bilo broj paralelnih telefonskih linija. Predložen je još čitav niz drugih zašitnih mjera, ali je njihova neekonomičnost spriječila, da se primijene u praksi. — U Njemačkoj se naročita pažnja obraćala zaštitnim sredstvima koja treba primijeniti kod linija slabe struje. Kod toga se iskoristila okol-


Slika 45

nost, da kablovski omot vezan na zemlju zajedno sa armaturom uslijed induciranih struja, koje se u njima javljaju, vrše slično zaštitno djelovanje na vodove u kabelu kao i šinje ili zasebni povratni vod. Struja u omotu izaziva sa svoje strane u kablovskim vodovima inducirane napone koji su suprotni naponima induciranim direktno od vodne žice, te se na taj način opasni naponi u kablovskim vodovima smanjuju.

Žice u kabelu sa olovnim omotačem ili u armiranom kabelu pokazuju kod frekvencija od $16^2/_3$ do 50 herca za 20% niže inducirane napone nego obična izolirana žica, koja se nalazi na istom mjestu gdje i kabel. Kaže se da je »zaštitni faktor« za tehničke frekvencije 0,8 (tablica IV.).



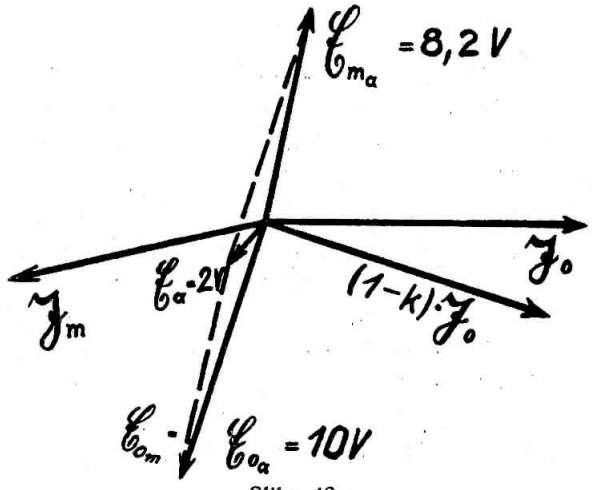
Tablica IV. — Zaštitni faktori.

| Frekvencija u Hercima | Kabel | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | bez armiranja | sa armaturom od pljosnate žice | sa armaturom od čelične trake | sa specijalnom armaturom visokog permeabiliteta | sa armaturom od čelične trake i bakrenom zaštitom 20 mm² | sa specijalnom armaturom od čelične trake i bakrenom zaštitom 20 mm² |
| Tehničke frekvencije | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | 0,15 |
| 300 | 0,5 | 0,39 | 0,18 | — | 0,07 | 0,02 |
| 800 | 0,5 | 0,19 | 0,11 | 0,07 | 0,03 | 0,01 |
| 2000 | 0,4 | 0,08 | 0,15 | 0,03 | 0,01 | 0,01 |

Mora se nastojati da se poveća struja u omotu i da se po mogućnosti pojača njeno djelovanje na žile u kabelu. Ono prvo postiže se smanjenjem otpora kablovskog omota, a drugo povećanjem uzajamne indukcije prema žilama kabela, koja postaje to veća što je veća samoindukcija žila, pošto je magnetna struja ista i za žile i za omot. Otpor armature smanjuje se, kad se armatura (slično kao šinje) na svakom mufu, bilo to običnom za nastavak, bilo na mufovima za kondenzatore ili ovojnice, dobro spoji pomoću naročitih bakrenih spojnica koje se dobro zalotaju. Unutrašnji olovni omot sam po sebi dobro je spojen na nastavcima pomoću olovnih mufova koji se moraju lotati. Naročito povoljno djeluje na smanjenje otpora omota jedan sloj golih bakrenih žica koje se stave ispod olovnog omota.

Znatno povećanje samoindukcije armature postiže se, ako se mjesto armature sa plosnatom žicom upotrijebi armatura od željeznog traka, koji se u blagim navojcima omata oko olovnog omota. Magnetne silocrte, koje proizvodi struja u omotu, teku u krugovima oko kabela i nailaze na vrlo veliki magnetni otpor u mnogim zračnim međuprostorima, ako je armatura načinjena od plosnate žice. Ako se upotrijebi armatura od željeznog pasa smanjuje se inducirani napon u kabelu za iznos od 40% (zaštitni faktor 0,6). — Ako je željezni pas načinjen od materijala visokog permeabiliteta, da se na taj način još više poveća samoindukcija kablovskog omota dobiti će se zaštitni faktor 0-4. Ako se kraj toga upotrijebi još i bakrena zaštita od 20 mm² prosjeka dobiti će se još povoljniji zaštitni faktori 0,2 odn. 0,15 t. j. smanjivanje induciranih napona na 15 do 20%.

Proučiti ćemo sad točnije, pomoću sl. 46, odnose kod kabela sa običnom armaturom od željeznog pasa i jednim slojem bakrenih žica ispod olovnog omota. U omotu i u kablovskim žilama inducira dio struje u troli $(1—k)\,\mathfrak{J}_0$, koji nije kompenziran šinjama, elektromotornu silu $\mathfrak{E}_{0m} = \mathfrak{E}_{0a}$ koja zaostaje za 90°. Ovaj napon proizvodi u omotu struju, $\mathfrak{J}_m$ koja je određena prividnim otporom omota $(R_m + j\omega L_m)$. Veličina ove struje raste kad otpor omota pada, a razlika u fazi ove struje prema naponu približuje se to više 90° što je veća samoindukcija i vodivost kablovskog omota. Struja u omotu inducira sa svoje strane u kablovskim žilama elektromotornu silu,



Slika 46

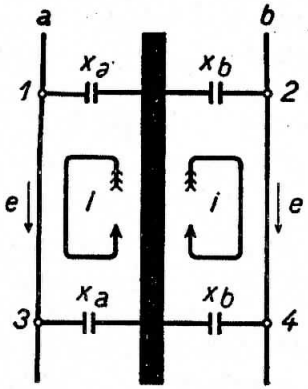
koja zaostaje za nešto više od 90°, a koja se vektorski zbraja sa elektromotornom silom neposredno induciranom od nekompenziranog djela struje u troli. Što fazna razlika između $\mathfrak{J}_m$ i $\mathfrak{E}_{m_a}$ iznosi nešto više od 90° tome je uzrok željezo u armaturi, jer uslijed histerezije $\mathfrak{B}$-polja zaostaje iza $\mathfrak{H}$-polja.

Rezultantni napon u kablovskim žilama $\mathfrak{E}_a$ u toliko je manji što je po veličini $\mathfrak{E}_{m_a}$ bliže $\mathfrak{E}_{0a}$ t. j. što je veća struja u kablovskom omotu $\mathfrak{J}_m$ i što je veća fazna razlika između $\mathfrak{E}_{0m}$ i $\mathfrak{J}_m$.

Indukciono djelovanje struje u troli bilo bi prema jedn. 122 proporcionalno frekvenciji, te bi na taj način bilo mnogo jače za harmonična titranja koja leže u oblasti govornih frekvencija, nego za osnovnu frekvenciju. Međutim, sa većom udaljenošću vodne žice, kao što je spomenuto, uzajamna indukcija jako pada kad frekvencija raste (vidjeti sl. 42), dok s druge strane djelovanje malo prije spomenutih prirodnih i umjetnih zaštitnih sredstava raste sa frekvencijom (vidjeti tablicu IV). Mnogobrojna mjerenja su pokazala, da je inducirani napon u kablovskim žilama, t. zv. »napon šumova«, koji proizvode harmonična titranja razmjerno neznatan, a u svakom slučaju znatno manji nego što je to slučaj kod zračnih linija koje se nalaze na istoj udaljenosti.



Kao štoje spomenuto, javlja se inducirana struja i u kablovskim žilama koje su odlično izolirane prema zemlji i ta se struja zatvara preko kompleksa kapaciteta prema zemlji (vidjeti sl. 24) i preko omota i armature spojenih sa zemljom. Otpor kruga može



Slika 47

se potpuno zanemariti prema prividnom otporu kapaciteta prema zemlji. On je obrnuto proporcionalan frekvenciji; prema tome se naročito lako razvijaju inducirane struje u oblasti govornih frekvencija prouzrokovane harmonikama struje u troli. U daljem izlaganju ćemo opisati štetni utjecaj ovih struja na razgovore koji se vrše po kabelu izloženom indukciji.

U slici 47 *a*, *b*, znači jedan par žila u kabelu čiji je omot spojen sa zemljom; radi jednostavnosti predstavljanja omot kabela nacrtan je debelom crtom u sredini između žila. Raspoređeni kapaciteti pojedinih žila prema zemlji mogu se zamisliti koncentrirani u točkama čiji su razmaci mali u odnosu prema valnoj duljini. Slika predstavlja jedan takav mali dio kabela. Sa ovom predpostavkom može se dalje uzeti, da su susjedni koncentrirani kapaciteti prema zemlji a-voda $(x_a)$ jednaki, a isto tako i kapaciteti voda *d* $(x_b)$. Inducirane elektromotorne sile uslijed paralelne linije jake struje imaju isti

pravac i veličinu u svima vodovima kabela i proizvode u jednom određenom trenutku kružne struje i označene strijelicama. Potrebno je da padovi napona *1—3* i *2—4* budu sasvim jednaki, jer ova dva djelomična napona ne djeluju u govornom krugu suprotno jedan drugome. Ako je ovaj uslov ispunjen u svima dijelovima kabela, kroz aparate koji zatvaraju govorni krug neće teći nikakva struja izjednačenja, pa se u njima neće čuti nikakvi strani šumovi koji izazivaju smetnju. Pošto se otpori vodova na duljinama *1—3* i *2—4* (a u danom slučaju i otpori ovojnica) mogu smatrati kao jednaki, moraju i kružne struje i biti jednake da padovi napona e budu jednaki. Kako su kružne struje izazvane jednakim induciranim naponima u svima vodovima, moraju, prema tome, i ukupni otpori strujnih krugova biti jednaki. Osim jednakih otpora vodova (ovojnica) i neznatnog otpora zajedničkog povratnog voda, imaju obadva kruga i kapacitete $x_a$ odn. $x_b$ prema zemlji vezane u red. Potrebna jednakost ukupnih otpora krugova dovodi do jednadžbe:

$$\frac{2}{j\omega x_a} = \frac{2}{j\omega x_b}, \text{ ili } x_a = x_b, \tag{118}$$

t. j. na promatranom kratkom dijelu kabela na pr., između dvije ovojnice Pupinovog kabela, moraju kapaciteti prema zemlji *a*-voda i *b*-voda biti jednaki.

Prema jednadžbi 115 inducirani naponi prema zemlji dvaju vodova u kabelu istoga promjera a veće duljine odnose se, otprilike, kao valni otpori krugova sastavljenih od vodova, kapaciteta prema zemlji i zemlje kao povratnog voda. Valni pak otpori odnose se, prema jedn. 51 i 52, otprilike, obrnuto kao drugi korjeni iz kapaciteta prema zemlji. Dakle biti će:

$$\frac{E_a}{E_b} \approx \sqrt{\frac{x_b}{x_a}} \tag{119}$$

Za efektivni napon koji izaziva smetnju u paru *a—b* $E_p = E_b - E_a$ vrijediti će:

$$\frac{E_p}{E_b} \approx 1 - \sqrt{\frac{x_b}{x_a}} = 1 - \sqrt{1 - \left(1 - \frac{x_b}{x_a}\right)}. \tag{120}$$

Pošto se $x_b$ i $x_a$ malo međusobno razlikuju to je $\left(1 - \frac{x_b}{x_b}\right) \ll 1$ te možemo metnuti:

$$\frac{E_p}{E_b} \approx 1 - \left(1 - \frac{1 - \frac{x_b}{x_a}}{2}\right) = \frac{x_a - x_b}{2x_a} = \frac{\Delta x}{2x_a} \approx \frac{\Delta x}{2x_b} \approx \frac{E_p}{E_a}. \tag{121}$$



Koja je dopuštena procentualna razlika kapaciteta prema zemlji dovodne i povratne linije jednog kruga? Ako na pr. sa jednog telefonskog aparata odlazi u danu telefonsku liniju efektivni izmjenični napon od 1 V i ako je gušenje linije $b = 2{,}3$ Nepera, to će na kraju linije stajati na raspoloženju napon $1 \cdot e^{-2{,}3}$ (jedn. 45) $= 0{,}1$ V Inducirane struje neće smetati nikako postojećem razgovoru ako se njihova fonička jakost razlikuje za $\Delta b = 3{,}5$ Nepera od jakosti dolazećih govornih struja. Prema tome, napon šumova $E_p$ smije iznositi $E_p = 0{,}1 \cdot e^{-3{,}5} \approx 0{,}003$ V. U vodovima dotične linije u kabelu iznositi će inducirani napon harmoničkih titranja 2 V ako je jakost struje u troli 100 A. Biti će dakle, $\frac{E_p}{E_b} = \frac{0{,}003}{2} = 0{,}15\%$. Razlika kapaciteta prema zemlji obadvaju vodova smije biti, prema jedn. 121, 0,3% njihovih kapaciteta prema zemlji. Praksa je pokazala da je ova točnost dovoljna.

Za fantomski krug vrijedi isto što i za stvarne krugove *1* i *2*. Da ne bude indukcije u stvarnom krugu mora biti $x_{a_1} = x_{b_1}$ i $x_{a_2} = x_b$ a u fantomnom krugu $x_{a_1} + x_{b_1} = x_{a_2} + x_{b_2}$ prema tome mora biti $x_{a_1} = x_{b_1} = x_{a_2} = x_{b_2}$. ) znači, da kapacitet prema zemlji svih četiriju vodova jedne četvorke, na duljinama koje su male u odnosu prema valnoj duljini titranja koja dolaze u obzir, moraju biti jednaki, ako se hoće da zaštite sva tri strujna kruga četvorke od indukcije jake struje.

Kod kablova sa zvjezdastim četvorkama, bez iskorišćenja fantomnih krugova, dovoljno je, razumije se, izjednačenje prema zemlji svakog para za sebe ($x_{a_1} = x_{b_1}$, $x_{a_2} = x_{b_2}$).

Za izjednačenje kapaciteta prema zemlji postoje iste mogućnosti kao i kod izjednačenja u pogledu preslušavanja, opisanog u odjeljku 6 i to: umetanje triju malih dopunskih kondenzatora na kratkim razmacima, na pr. u svakoj sekciji Pupinovog kabela između olovnog omota spojenog sa zemljom i onih vodova koji pokazuju manje kapacitete prema zemlji, ili, još jednostavnije, križanje tako, da se razlike kapaciteta prema zemlji stvarnih krugova i fantomnog kruga po mogućnosti poništе u svakoj sekciji kabela. S obzirom na manju potrebnu točnost izjednačenja kao i na usavršenu fabrikaciju današnjih kablova, dovoljno je izvršiti takva ukrštavanja samo na jednom mjestu kablovske sekcije, te se četvorke ne moraju ukrštavati. Prema tome, ne mijenja se način brojenja kablovskih četvorka, kao što je to slučaj kod ukrštavanja radi otklanjanja preslušavanja.

Ako smo ovim putem odstranili razlike kompleksa kapaciteta prema zemlji, pa zatim izvršimo izjednačenje sprega preslušavanja, kao što je to opisano u odjeljku 6, opet će se pokvariti simetrija vodova prema zemlji, dakle ponovo će se javljati inducirane struje u kabelu.

Kao što smo vidjeli iz jedn. 79 i 81 sprege preslušavanja stoje na prilično kompliciran način u vezi sa djelomičnim kapacitetima prema zemlji, pa prema tome i sa razlikama ovih kapaciteta. Odnos razlike $\Delta x$ kompleksa kapaciteta prema zemlji $x_a$ i $x_b$ za stvarni krug $l_a$ $l_b$ i djelomičnih kapaciteta prema zemlji $w'_1$ i $w'_2$ s jedne strane, kao i razlike bočnih kapaciteta mjerodavnih za preslušavanje između fantomnog kruga i stvarnog kruga $l_a$, $l_b$ s druge strane, može se izraziti slijedećom jednadžbom:

$$\Delta x = w'_1 - w'_2 + \delta\,[(x'_1 + x'_3) - (x'_2 + x'_4)] \text{ (jedn. 80)} \quad (122)$$

gdje $\delta$ u praktičnim slučajevima iznosi 0,5 do 0,9. Ako otklonimo razliku kompleksa kapaciteta prema zemlji, biti će lijeva strana jednadžbe jednaka 0. Matematički to odgovara oduzimanju veličine $\Delta x$ od obadviju strana jednadžbe:

$$\begin{aligned} 0 &= -\Delta x + w'_1 - w'_2 + \delta\,[(x'_1 + x'_3) - (x'_2 + x'_4)] \\ &= w'_1 - (w'_2 + \Delta x) + \delta\,[(x'_1 + x'_3) - (x'_2 + x'_4)]. \end{aligned} \quad (123)$$

Nastaje sprega preslušavanja:

$$k_2 = (x'_1 + x'_3) - (x'_2 + x'_4) + \frac{w'_1 - (w'_2 + \Delta x)}{2}, \quad (124)$$

ako zanemarimo korekcioni član na desnoj strani jedn. 80. Ovu ćemo spregu otkloniti oduzimajući veličinu $k_2$ od obadvije jednadžbe:

$$\begin{aligned} 0 &= -k_2 + (x'_1 + x'_3) - (x'_2 + x'_4) + \frac{w'_1 - (w'_2 + \Delta x)}{2} \\ &= (x'_1 + x'_3) - (x'_2 + x'_4 + k_2) + \frac{w'_1 - (w'_2 + \Delta x)}{2} \end{aligned} \quad (125)$$

Sad nastaje nova razlika kapaciteta prema zemlji:

$$\Delta' x = w'_1 - (w'_2 + \Delta x) + \delta\,[(x'_1 + x'_3) - (x' + x'_4 + k_2)]. \quad (126)$$

Oduzeti ćemo jednadžbu 123 pa ćemo dobiti:

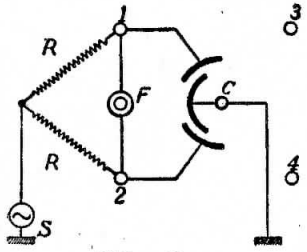
$$\Delta' x = -\delta\, k_2. \quad (127)$$

Dakle uslijed naknadnog izjednačenja sprege preslušavanja nastaje nova razlika kapaciteta prema zemlji veličine $\delta k_2$. Ako bismo, obrnuto, prvo izjednačili preslušavanje a potom komplekse

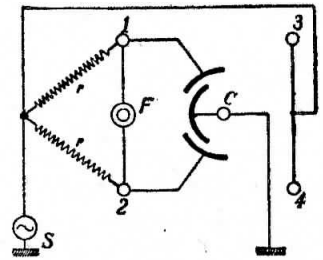


kapaciteta prema zemlji, opet bi bila pokvarena simetrija između vodova, pa bi se ponovno javilo preslušavanje.

Jedan laki izlaz iz ove poteškoće sastoji se u tome, da se načini da budu međusobno jednaki djelomični kapaciteti prema zemlji $w'_1$ do $w'_4$ (sl. 24) a ne kompleksi kapaciteta prema zemlji. Na ovaj se način, doduše, ne uspostavlja odmah simetrija prema zemlji. U jedn. 79 do 81 otpadaju svi nelinearni članovi i slijedeće izjednačenje preslušavanja ograničava se samo na izjednačenje bočnih djelomičnih kapaciteta $x'_3$ do $x'_4$. Poslije izvršenog potpunog izjednačenja obiju vrsta djelomičnih kapaciteta, biti će četvorka potpuno simetrična sama za sebe i prema zemlji; prema tome neće biti ni preslušavanja ni indukcije jakih struja. Takvo kombinirano izjednačenje preporuča se i onda, kad se tek poslije nekoliko go-



Slika 48

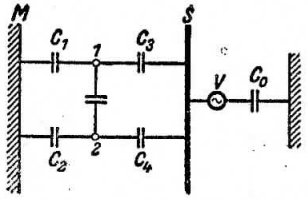


Slika 49

dina može računati sa utjecajem jake struje, te da se ne bi tada moralo ponavljati i izjednačenje preslušavanja. — U slikama 48 i 49 predočena su mjerenja razlika kompleksa kapaciteta prema zemlji i razlika djelomičnih kapaciteta prema zemlji stvarnog kruga 1, 2 pomoću diferencijalnog kondenzatora. Vidimo da se u šemi za mjerenje mogu odvojiti djelomični kapaciteti prema zemlji od kompleksa kapaciteta prema zemlji pomoću jedne jednostavne dopunske veze. Vezanjem kratko spojenog stvarnog kruga *3,4* sa zajedničkom točkom otpora r,r djelomični kapaciteti $w'_3$ i $w'_4$ prema zemlji (sl. 24) spajaju se paralelno sa izvorom struje tako, da za mjerenje ne dolaze u obzir. Otpori *r*, *r* leže paralelno sa djelomičnim bočnim kapacitetom, pa moraju biti mali u odnosu prema prividnom otporu kapaciteta, da se ne dobiju pogrješni rezultati mjerenja.

I uslijed razlike u otporima između dva voda jednoga kruga, kao i razlike u namotajima umetnutih ovojnica, a prije svega uslijed nejednakosti samoindukcije kod ovojnica, mogu se javiti različni padovi napona u obadva voda uslijed izvana induciranih struja

(sravniti šemu u sl. 47), pa prema tome može nastati razlika potencijala između vodova a uslijed nje struja izjednačenja u slušalicama aparata kojima je linija završena. Takve nejednakosti mogu dati povoda iz istog principijelnog razloga kako za šumove koji nastaju uslijed jakih struja, tako i za preslušavanje između stvarnog i fantomnog kruga (odjeljak 5). Uslovi za otklanjanje šumova uslijed jakih struja nisu tako strogi kao što su uslovi za simetriju parova u kabelu povodom preslušavanja. Drukčije stoji stvar sa nesimetrijom između dovodne i povratne linije fantomnog kruga koja se mogla praktično potpuno zanemariti prilikom proučavanja preslušavanja. Radi otklanjanja induciranih šumova u fantomnom krugu propisano je, da se obadvije polovine namotaja fantomne ovojnice ne smiju



Slika 50

razlikovati za više od 0,15 Oma, a samoindukcije za najviše 0,5% od samoindukcije fantomnog kruga (na pr. za efektivnu samoindukciju u fantomnom krugu od 0,07 H na 0,35 m H).

Posljednja vrsta smetnja uslijed jakih struja pretstavljena je u sl. 50. Kompleksi kapaciteta dovodne linije *1* i povratne linije *2* jednog para ili fantomnog kruga prema omotu *M* vezanim sa zemljom, sastoje se iz djelomičnih kapaciteta prema zemlji $C_1$ i $C_2$ iz djelomičnih kapaciteta prema svima susjednim vodovima, koji imaju kapacitete prema zemlji. Djelomične kapacitete prema ostalim vodovima promatranih dviju linija uračunati ćemo u komplekse kapaciteta $C_3$ i $C_4$ prema metalnom zaklonu *S* sastavljenom od svih susjednih vodova, koji opet sa svoje strane ima ukupni kapacitet prema zemlji $C_0$. Malo prije opisanim izjednačenjem djelomičnih kapaciteta prema zemlji postiglo se da je $C_1 = C_2$ ali ne da je $C_3 = C_4$. Ako u jednom specijalnom slučaju odustanemo od izjednačenja preslušavanja i ako hoćemo da izjednačimo komplekse kapaciteta obadvaju vodova prema zemlji dobiti ćemo:

$$C_1 + \frac{C_3 \cdot C_0}{C_3 + C_0} = C_2 + \frac{C_4 \; C_0}{C_4 + C_0},$$



$$C_1 = C_2 + C_0 \cdot \frac{C_4(C_3 + C_0) - C_3(C_4 + C_0)}{(C_3 + C_0)(C_4 + C_0)}$$

$$= C_2 + C_0 \cdot \frac{C_3C_4 + C_4C_0 - C_3C_4 - C_3C_0}{(C_3 + C_0)(C_4 + C_0)},$$

$$= C_2 + C_0^2 \cdot \frac{C_4 - C_3}{(C_3 + C_0)(C_4 + C_0)}. \qquad (128)$$

I sad je $C_1$ različno od $C_2$ osim ako slučajno još u početku nije bilo $C_3$ jednako $C_4$. U metalnom zaklonu *S* inducira susjedna jaka struja napon *V* prema zemlji, koji se između ostalog izjednačuje preko kapaciteta $C_3$, $C_1$ i $C_4$, $C_2$ vezanih u red. Linije *1* i *2* ostati će samo onda uvijek na istom potencijalu, tako da se u krugu *1,2* ne bi javila nikakva struja izjednačenja, ako bi bilo:

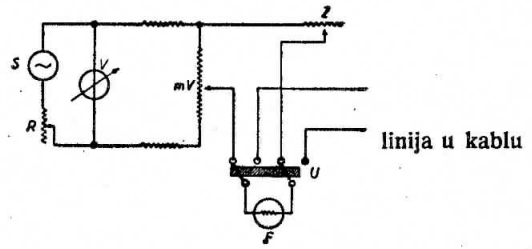
$$\frac{C_3}{C_1} = \frac{C_4}{C_2} \qquad (129)$$

U obadva navedena slučaja ovo u opće nije ispunjeno i ne može se sa jednostavnim sredstvima umjetno postići, pošto su $C_3$ i $C_4$ sastavljeni iz velikog niza pojedinačnih kapaciteta. Na sreću kod jednolično fabriciranih kablova ova vrsta smetnja uslijed jakih struja neznatna je prema smetnjama koje su naprijed proučavane.

Ako se za pojedine vodove u kabelu vežu neposredno zračne linije, onda će se u ovim posljednjima, ako su paralelne sa linijama jake struje, javljati mnogo viši naponi uslijed influence i indukcije koji će prelaziti i na žile u kabelu sa kojima su one metalno spojene. Smetnje uslijed jake struje, o kojima smo malo prije govorili, biti će u ostalim žilama kabela mnogo jače nego u slučaju neznatnih napona induciranih u samom kabelu. Ovo se događa i onda kad su same zračne linije bez šumova, t. j. kad su simetrične, jer je smetnja uslijed jake struje, o kojoj je riječ, uslovljena nesimetrijom kompleksa kapaciteta $C_3$ i $C_4$ u samom kabelu. Da se ova nezgoda otkloni, potrebno je metalno odvojiti žile u kabelu od zračnih linija i to pomoću translatora. Ali i u tom slučaju prelazi jedan dio napona sa zračnih linija u kabel preko neznatnog kapaciteta između namotaja translatora. S toga se postiže još bolji rezultat, kad se upotrijebe translatori koji imaju između primarnog i sekundarnog namotaja metalni zaklon vezan sa zemljom. Naponi, koji se jave na zračnoj liniji prema zemlji, potpuno se izjednačuju preko kapaciteta koji postoji između namotaja translatora vezanog na zračnu liniju i metalnog zaklona spojenog sa zemljom. Ovaj metalni zaklon

mora imati proreze okomite na ravninu namotaja, da se spriječi pojav vrtložnih struja u njemu, koje nastaju uslijed transformacije.

Završiti ćemo ovaj odjeljak kratkim pregledom nekoliko metoda mjerenja koje je posljednjih godina izradila tvrtka Siemens i Halske u cilju utvrđivanja kvaliteta kablova u pogledu smetnja uslijed jakih struja. Prije je bilo uobičajeno da se ispred linije, koja je u smetnji uključi umjetna linija sa promjenljivim gušenjem i da se gušenje dotle povećava, dok se više ne čuje šum. Koliko je upotrijebljeno gušenje veće toliko je smetnja jača. — Ova vrlo subjektivna i netočna metoda mjerenja zamijenjena je sad metodom određivanja »napona šumova«. U tome cilju uspoređuje se šum koji nastaje u kablovskom krugu sa tonom jednog oscilatora




Slika 51

(sl. 51). Napon koji daje oscilator *S* udesi se pomoću promjenljivog otpora *R* na jednu određenu vrijednost koja se čita na voltmetru sa cijevima *V* (odjeljak 9). Zatim se, potenciometru označenom sa *mV* uzme takav napon, da se kod prebacivanja sa kruga koji se mjeri na potenciometar ima utisak u slušalici *F*, kao da je u obadva slučaja jakost glasa ista, t. j. da isti napon djeluje na slušalicu. Potenciometar je graduiran neposredno u *mV*. Elektromotorna sila šumova i elektromotorna sila za uspoređivanje uzeta na potenciometru treba da izazovu u slušalici *F* istu struju u obadva položaja preklopca *U*, što znači da djeluju preko jednakih otpora. Zbog toga treba udesiti otpor promjenljivog otpornika *Z* tako, da bude jednak prividnom otporu kablovske linije koja se mjeri. Napon šumova u iznosu od 2 milivolta još je dopušten za međugradske kablove i ako se kod napona od 0,1 milivolta, dakle dvadeset puta manjem od dopuštenog, još može čuti šum.

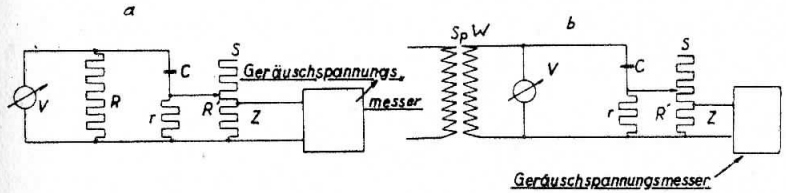
Potrebno je u mnogo slučajeva da se odredi induktivno djelovanje vodova jake struje prije nego što se struja pusti u rad. U tom slučaju šalje se izmjenična struja od 800 perioda i dovoljne jakosti



iz naročitog strujnog izvora za ispitivanje u liniju jake struje i mjeri se pomoću aparata za mjerenje napona šumova inducirano djelovanje u telefonskoj liniji. Na mjesto naročite struje za ispitivanje doći će kasnije kad se jaka struja pusti u rad, harmonična titranja jake struje koja će izazivati smetnju. Prema tome može se reći:

Struja, koja izaziva smetnju $I_{St}$, to je ona jakost struje kod 800 perioda koja proizvodi na telefonskim linijama istu smetnju kao i zbroj izmjeničnih struja koje stvarno teku u vodovima jake struje. Njen odnos prema osnovnom valu jake struje naziva se »dobrota struje« električnog uređaja.

Struja koja izaziva smetnju i dobrota struje jedne električne centrale koja je u radu ili njenih pojedinih strojeva (generatora i motora) određuje se pomoću aparata za mjerenje šumova na slije-




Slika 52 (aparat za mjerenje napona šumova)

deći način: Aparat se priključi, prema sl. 52a na otpor *R* kroz koji se šalje jaka struja koja se ispituje. Pad napona na ovom otporu čita se na voltmetru *V*. Može se smatrati da će voltmetar pokazivati napon osnovnog titranja sa dovoljnom točnošću i onda, kad su harmonična titranja jako izražena. Kondenzator *C* zatvara put niskofrekventnom osnovnom titranju, a propušta tim bolje harmonična titranja, što ona imaju više frekvencije. Ova će, dakle, protjecati kroz mali otpor *r* ne u odnosu jakosti u kakvom se odnosu nalaze u struji iz stroja, nego još pomnoženom sa odnosom frekvencije. A mi smo to baš i željeli pošto, prema jedn. 109 djelovanje smetnje raste proporcionalno frekvenciji struje koja izaziva smetnju. Radi ugodnijeg ugađanja jakosti zvuka predviđen je još jedan potenciometar *S*. promjenljivi otpor *Z* aparata za mjerenje napona šumova (sl. 49) treba udesiti da bude jednak fiksiranom otporu *Z'* na potenciometru. Šum, koji izvode harmonična titranja sravnjuje se sad sa tonom oscilatora *S*. Kod iste jakosti zvuka dobiti ćemo u slušalici *F* jedan

određeni napon koji proizvađa smetnju, $E$ *mV* ili $\frac{E}{1000}$ Volta. Njemu odgovara pad napona $\frac{E}{1000} \cdot \frac{R'}{Z}$ Volta (sl. 52a) koji nastaje na otporu $r$ uslijed harmoničnih titranja struje koja proizvađa smetnju. Kroz $r$ protječe dakle struja $\frac{E}{1000} \cdot \frac{R'}{Z} \cdot \frac{1}{r}$ Ampera. Pošto se $r$ može zanemariti u odnosu prema vrijednosti prividnog otpora $\frac{1}{\omega C}$ pred njim uključenog kondenzatora, to će navedena struja protjecati kroz $C$ i $r$ vezane u red, uslijed napona $\frac{E}{1000} \cdot \frac{R'}{Z} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{\omega C}$ Volta. Ako izrazimo $C$ u $\mu F$ dobiti ćemo $\frac{1000\,E \cdot R'}{\omega C \cdot r \cdot Z}$ Volta. Ovaj napon je međutim pad napona, koji proizvađaju harmonična titranja jake struje na otporu $R$. Prema tome jakost struje harmoničnih titranja (struje koja proizvodi smetnju) biti će:

$$I_{st} = \frac{1000\,E \cdot R'}{\omega C \cdot r \cdot R \cdot Z} \text{ Ampera} \qquad (130)$$

ako $E$ označimo u mV, $C$ u μF a otpore u Omima.

Ukratko ćemo još spomenuti, radi potpunosti, kako se na sasvim odgovarajući način određuje prema sl. 52b smetnja koja nastaje uslijed viših harmoničnih valova krivulje napona jednog uređaja jake struje, makar se ovdje radi o elektrostatičkom djelovanju (influenci) na susjedne telefonske linije, koje, prema ranijim objašnjenjima, dolazi u obzir samo za zračne telefonske linije. Priključak aparata za mjerenje napona šumova vrši se ovdje pomoću transformatora *SpW*. Naponu šumova $E$ *mV* odgovara opet napon $\frac{1000 \cdot E \cdot R'}{\omega C \cdot r \cdot Z}$ Volta na krajevima redne sprege kapaciteta $C$ i otpora $r$. Napon jake struje, koji izaziva šumove, dobiva se množenjem sa brojem prenosa transformatora:

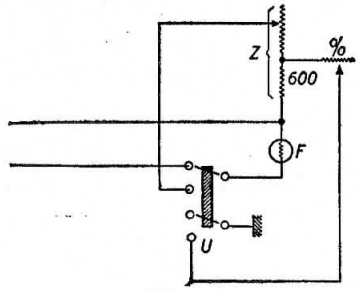
$$E_{st} = \frac{1000x \cdot E \cdot R'}{\omega C \cdot r \cdot Z} \text{ Volta.} \qquad (131)$$

Ovdje je $E$ u mV, $C$ u $\mu F$ a otpori u Omima.



Napon smetnje $E_{st}$ jeste onaj napon frekvencije 800 Herca koji izaziva istu smetnju u telefonskom krugu kao i zbroj stvarno djelatnih izmjeničnih napona. Odnos njegov prema naponu osnovnog titranja zove se »dobrota napona« jake struje.

Radi mjerenja »nesimetrije šumova« obadva voda jednog telefonskog kruga služi aparat šematički predočen u slici 53. Slušalica $F$ spaja se jedanput sa linijom u kabelu koja se mjeri a drugi put sa jednim vodom te linije i zemljom. U posljednjem slučaju kroz slušalicu prolazi cio inducirani napon prema zemlji. Na potenciometru, koji je graduiran u %, uzima se toliki napon, da se u obadva položaja prekidača dobije ista jakost zvuka u slušalici $F$, t. j. da na slušalicu djeluje isti napon. Na potenciometru čita se neposredno u procentima odnos napona šumova na liniji prema naponu prema zemlji. Pro-



Slika 53

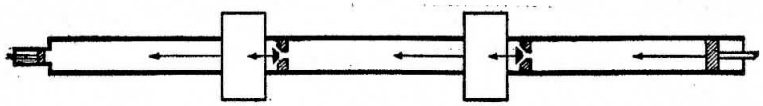
mjenljivi otpor se opet udešava da bude jednak prividnom otporu kruga koji se mjeri. Nesimetrija šumova modernih izjednačenih kablova iznosi manje od 1%.

Vidimo, da drugo opisano mjerenje pokazuje djelovanje smetnje na strani jake struje, treće mjerenje pokazuje osjetljivost na strani slabe struje, a prvo mjerenje pokazuje rezultat za cijeli uređaj.

Amerikanska tehnika upotrebljava slične metode mjerenja, koje se u glavnom razlikuju po tome što se napon, koji izaziva smetnju, isporeduje sa smjesom tonova koja se proizvodi vibratorom. Jačina smetnje mjeri se u »jedinicama šumova«; naponu šumova od 2 mV odgovara okruglo 120 jedinica šumova. Amerikanci su izradili aparaturu za mjerenje struja odn. napona koji izazivaju smetnju tako, da su viša harmonična titranja uzeta u obzir u mjeri koja odgovara srednjoj osjetljivosti čovječjeg uha za titranja različnih frekvencija.

## 7. AMPLIFIKATOR ZA IZMJENIČNU STRUJU. ELEKTRONSKA STRUJA I KATODNE CIJEVI SA USIJANOM KATODOM I VISOKIM VAKUMOM. ŽELJEZNI OTPORNIK

Prvi veliki uspjeh pupiniziranja međugradskih kablova u Evropi bio je tako zvani »rajnski kabel«, koji je od godine 1912 do 1921, sa prekidom za vrijeme svjetskoga rata, spajao Berlin sa centrom industrije u rajnskoj oblasti. Govorni krug ovoga kabela sa najmanjom konstantom gušenja sastojao se iz jako pupiniziranih vodova od 3 mm ($f_0 = 2300$ Herca) pa je konstanta gušenja iznosila $\beta = 0{,}0033$ Nepera/km., tako da je ukupno gušenje na trasi Berlin —Köln dugoj 600 km. iznosilo $600 \cdot 0{,}0033 \approx 2$ Nepera, dok se danas obično ne dopušta veće gušenje između dviju međugradskih centrala od 1,3 Nepera. Prema modernim shvatanjima došlo se kod rajnskog kabela do krajnje daljine dometa takvih kablova, jer da-



Slika 54

lje pojačanje presjeka žila iznad 3 mm, i bez obzira na ekonomičnost, prouzrokovalo bi naskoro nesavladive teškoće u fabrikaciji i polaganju.

Na internacionalnu daljinsku telefoniju moglo se misliti tek onda, kad se uspjelo, da se u pojedinim točkama duge telefonske linije dovede izvana nova energija, koja će vjerno pojačati već jako oslabljene govorne struje. Zamislimo pneumatički prenos energije na veliku daljinu. Neka se kreće tamo amo čep na početku zračne cijevi, u cilju da se na kraju cijevi izazove isto takvo gibanje drugog čepa pomoću zračnih valova koji nastaju uslijed stvaranja pritiska i vakuma. Međutim trenje zraka u cijevi tako oslabi ove valove, da oni ne mogu pokrenuti drugi čep. Pretpostaviti ćemo, da će zračni valovi na jednom dijelu cijevi biti u stanju pokrenuti bar jedan ventil (sl. 54). Ovaj ventil neka upravlja svojim kretanjem jednu pumpu sa pritiskom i usisavanjem koja je ugrađena na istom mjestu i koja će u istom taktu djelovati na susjedni dio cijevi. Na mjestu gdje su u ovome drugom dijelu cijevi zračni valovi jako oslabili ugraditi ćemo drugi ventil i drugu pumpu i t. d. dok ne uspijemo



umetanjem dovoljnog broja takvih »relea« da krećemo ček na desnom kraju cijevi onako kako smo namjeravali. Na ovaj način u svakoj »amplifikatorskoj« stanici iskorišćuje se dolazeća slaba energija za upravljanje u istom taktu jedne veće energije koja se u toj stanici nalazi.

Isto tako rade električni amplifikatori, čiju je prvu konstrukciju dao 1886 Edison i to na tom principu, da dolazeće slabe govorne struje pokreću telefonsku membranu koja istovremeno služi kao mikrofonska membrana na jednom mikrofonu. Titranja ove membrane, koja se vrše u taktu govornih struja, mijenjaju u istom taktu otpor mikrofona koji se napaja iz lokalnog izvora istosmjerne struje i šalje dalje u liniju pojačana titranja struje.

Veliki napredak u ovom smislu postignut je 1906 godine, kada je Austrijanac von Lieben konstruirao amplifikatorsku cijev ispunjenu razrijeđenom živinom parom u vakumu od jednog hiljaditog dijela mm. živinog stupca. Ta cijev je bila preteča modernim amplifikatorskim cijevima sa visokim vakuumom, čije se djelovanje osniva na istim principima. Stoga ćemo najprije govoriti o strujanju elektriciteta u najvećem vakuumu od $10^{-7}$ do $10^{-8}$ mm. živinog stupca, koji je dosad bilo moguće postići.

Za proučavanje najvažnijih pojava u krugu jednosmislene struje upotrebljava se često odgovarajuća hidraulička slika ali ona može služiti samo za usporedbu a nikako za objašnjenje. O suštini elektricitete takva slika ne kaže nam ništa, a nije dovoljna niti na usporedbu kad se prijeđe na proučavanje protjecanja elektricitete kroz tekućine, plinove ili kroz prostor praktično bezplinski.

I kraj težnje da se u ovoj knjizi činjenice izlože popularno ipak se ne može izbjeći da se, kraj uobičajenih predodžba o električnoj struji ne primijene i novija shvatanja o suštini elektricitete, koja još nisu postala tako popularna. Do prije nekoliko godina smatralo se je da su u mehaničkom pogledu najmanji dijelovi materije molekuli, koji se kemijskim putem mogu dalje razdvojiti u atome. Eksperimenti Lenarda i Rutherforda doveli su do shvatanja, da se svaki takav atom sastoji iz električno pozitivno nabijene jezgre i ljuske od najsitnijih dijelića negativne elektricitete tako zvanih elektrona, koji neprestano kruže oko jezgra. Izmjerena je masa ovih elektrona i ona iznosi $9 \cdot 10^{-28}$ grama. Svaki atom može se predstaviti kao sićušan sunčani sistem. U normalnom stanju neutraliziraju se pozitivna jezgra sunce i negativni elektroni planeti tako, da atom prema svojoj okolini djeluje kao nenabijen. Izvjesnim fizičkim procesima, na pr. sudarom dvaju molekula, može se atomska konstrukcija

razoriti. Ako je atom izgubio jedan ili više elektrona, izgledati će kao da prevlađuje njegov pozitivan naboj jezgre, te će na okolinu djelovati kao pozitivno nabijen; obrnuto, kad je nagomilano više elektrona, onda će izgledati da prevlađuje negativni naboj ljuske, pa atom djeluje kao negativno nabijen. Izbačeni elektroni, najmanji negativni dijelići naboja mogu za sebe postojati, dok su na protiv pozitivni naboji uvijek vezani za materiju.

U tekućinama i u plinovima vrši se strujanje elektriciteta pomoću kretanja električno nabijenih materijalnih djelića zvanih »jona«. Kad se prazni električni element ili akumulator, kreću se pozitivni joni (izvedeni kemijskim procesom) ka pozitivnom polu — »anodi« a negativni ka negativnom — »katodi«. Na polovima bi se skupljala pozitivna odn. negativna elektriciteta kad se ne bi mogla izjednačiti kroz vanjski zatvoreni strujni krug. Ako se u ovom krugu nalazi na pr. jedna posuda ispunjena kiselinom, to će se u njoj gibati pozitivni joni od plus pola ka minus polu, a negativni obrnuto, kod čega će se kiselina (»elektrolit«), kao što je poznato, rastvarati.

Isto tako vrši se gibanje jona i u plinovima u obadva pravca. Ako je pritisak plinova normalan, onda se ono vrši tek kod vrlo visokih napona (na pr. poznati pojav korone kod vodova vrlo visokog napona). U razrijeđenim plinovima kretanje se vrši i kod običnog napona ispod 250 Volta. U plinovima pojavi su komplicirani uslijed sudara plinskih jona, koje može dovesti do razaranja jona i odvajanja elektrona.

Ako se uzme najveći vakuum, onda za prenošenje elektriciteta neće više služiti materijalne čestice. Moguća je samo čista struja elektrona, koja se giba od negativnog pola (katode) ka pozitivnom polu (anodi). Suprotno strujanju elektriciteta u tekućinama i plinovima ovdje imamo samo jednostrano usmjereno strujanje.

Elektroni se moraju posebnim fizičkim procesom osloboditi od katode, izdvojiti iz njenog atomskog spoja, da privlačna sila pozitivne anode koja joj leži na suprot bude dovoljna da pokrene elektrone u smjeru anode, prema poznatom zakonu, da se električno suprotno nabijene čestice privlače (dok se čestice istoimeno nabijene odbijaju). Odvajanje elektrona od materijala katode vrši se na taj način, da se katoda, koja je načinjena od metalnog končića, veže na akumulator tako, da kroz nju prolazi dovoljno jaka struja koja je razžari do usijanja. Stvar se može tako predstaviti, da se povećanjem temperature izaziva sve intenzivnije vlastito kretanje molekula katode, koje napokon dovodi do njihovog razaranja. Već samo usijavanje katode pokazuje da se pri tom oslobađa svjetlosna energija.



Svako usijano tijelo šalje elektrone; ako nema vanjskog električnog polja koje će ih uhvatiti, oni padaju natrag, kao što neko tijelo bačeno u vis pada ponovo na zemlju.

Prema Richardson-Schottkyu šalje jedno usijano tijelo, koje se nalazi na apsolutnoj temperaturi $T$ (računatoj od apsolutne nule —273° C), u jednoj sekundi na svaki cm² površine

$$N = A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{b}{T}} \qquad (132)$$

elektrona. $A$ je jedna univerzalna konstanta (= 60,2) a $b$ je konstanta materijala.

Polazeći od razmatranja profesora Wehnelta i uzimajući materijal koji je još Lieben upotrebljavao za katodu njemačka tehnika zamijenila je prije nekoliko godina prvobitno upotrebljavanu usijanu katodu od volframove žice sa tako zvanom »oksidnom katodom«. Ova se sastoji iz žice od platine ili platinske legure (u novije vrijeme i od volframa) koja je specijalnom metodom obložena sa više slojeva mješavine alkalnih oksida. Ovi oksidi imaju svojstvo da izvanredno olahkoćuju emisiju elektrona ($b = 12.100$ u jedn. 132) tako da je dovoljno da se oksidna katoda zagrije do zatvoreno crvenog usijanja (oko 800° C). Za ovo je potrebna struja za žarenje katode od 1,1 Amp. za normalne njemačke cijevi kod telefonskih amplifikatora, a ova struja proizvodi pad napona od svega 1,8 V. Niska temperatura omogućuje vrlo veliku trajnost cijevi do stupnja kada elektronska emisija tako oslabi da cijev ne daje više dovoljno pojačanje. Za svaki procent za koji padne struja grijanja kod rada oslabi pojačavanje amplifikatora sa oksidnom katodom za $\Delta s_h = 3 \cdot 10^{-5}$ Nepera, a za svaki Volt smanjenja anodnog napona za $\Delta s^a = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$ Nepera.

Radi održavanja stalnosti jačine struje žarenja predviđeno je u njemačkoj tehnici automatsko reguliranje ove struje. U ovom cilju iskorišćen je pojav, da temperaturni koeficijent električnog otpora željeza u oblasti temperature, kad počinje crveno usijanje (oko 700°), a u prisutnosti vodika, ima izvanredno veliku vrijednost. Usijana nit katode veže se u red sa jednim takvim otporom od željezne žice $EW$ u sl. 66 i 67) i priključi na napon za grijanje. Željezni otpornik nalazi se u staklenoj posudi koja je hermetički zatvorena i napunjena vodikom.

Željezni otpornik i katoda vezani su u red. Ako se kroz njih pusti toliko struje da temperatura željeznog otpornika ostane ispod spomenute visine temperature, onda će, u koliko raste napon žare-

nja, proporcionalno rasti i jakost struje koja protječe kroz otpor i katodu. Ali, počam od jednog izvjesnog napona postati će jakost struje tako velika, a s njom i grijanje željeznog otpornika, da će otpornik dostići onu temperaturu na kojoj počinje naročito jak porast otpora u koliko temperatura dalje raste. Neznatni porast struje odn. temperature u otporniku proizvodi toliko povećanje otpora odn. toliki pad napona, da se sav višak napona potpuno utroši u željeznom otporniku ako se i dalje povećava napon grijanja. Na usijanu katodu amplifikatorske cijevi dolazi u ovoj oblasti praktično dovoljno konstantan napon, a prema tome, shodno Omovom zakonu, odgovarajuća konstantna struja. Tek ako se napon grijanja (prema tome i temperatura željeznog otpornika) tako poveća da se pređe ona povoljna oblast temperature, otpor opet raste sporije kad temperatura raste, t. j. sad će opet dalje povećanje napona grijanja prouzrokovati nov porast struje u otporniku i katodi. Dakle, željezni otpornik između dvije određene vrijednosti napona, koje odgovaraju donjoj i gornjoj granici njegove povoljne temperaturne zone, održava konstantnu jakost struje u cijelom krugu, nezavisno od visine napona grijanja.

Ove granice napona za željezne otpornike izrađene za standardne njemačke katodne cijevi sa oksidnom katodom iznose 4,3 i 9,5 Volta. Napon za grijanje smije dakle da se mijenja za 5,2 Volta pa da ipak jakost struje grijanja ostane u dopuštenim granicama. Na svaki način napon za grijanje mora biti najmanje za 4,3 Volta veći nego što iznosi pad napona na usijanoj katodi.

Slika 55 prikazuje opisani pojav. Omov zakon, $\frac{I}{E} = \frac{1}{R} = \text{const}$ predstavljen je (isprekidanim) pravcem u pravokutnom koordinatnom sistemu u kome su naponi apscise a ordinate jakosti struje. Pošto je $\frac{I}{E} = \frac{I_1}{E_1} = \frac{I_2}{E_2}$ const to ova jednadžba predstavlja pravac koji prolazi kroz koordinatni početak.

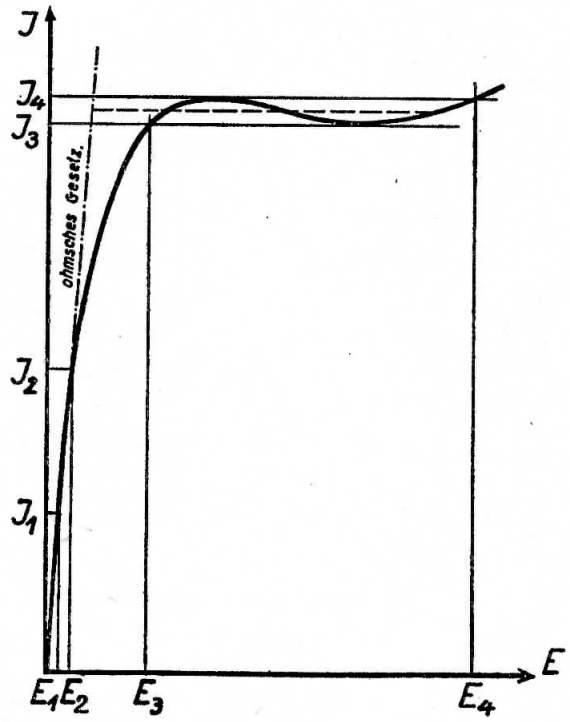
U povoljnoj oblasti jakost struje ostaje konstantna i kad napon raste, što je u koordinantnom sistemu predstavljeno isprekidanim pravcem paralelnim sa apscisnom osju. Kad se prijeđe povoljna oblast, morao bi se ucrtati kosi pravac koji se penje desno prema gore, da se predstavi ponovni porast jakosti struje kad raste napon. U praksi krivulja struje i napona ima oblik predstavljen izvučenom linijom. Jakost struje oscilira u povoljnoj zoni između jakosti $I_3$ i $I_4$; sa ovom točnošću kompenzira željezni otpornik sve oscilacije



napona između vrijednosti $E_3$ i $E_4$. U praksi u navedenim granicama napona, izaziva promjena napona za žarenje za ± 10% promjenu struje za žarenje za manje od ± 3%.

Opisano odstupanje od Omovog zakona samo je privremeno; jednadžba $E = R \cdot I$ ostaje uvijek u vrijednosti samo što se vrijednost $R$ mijenja na naročiti način.

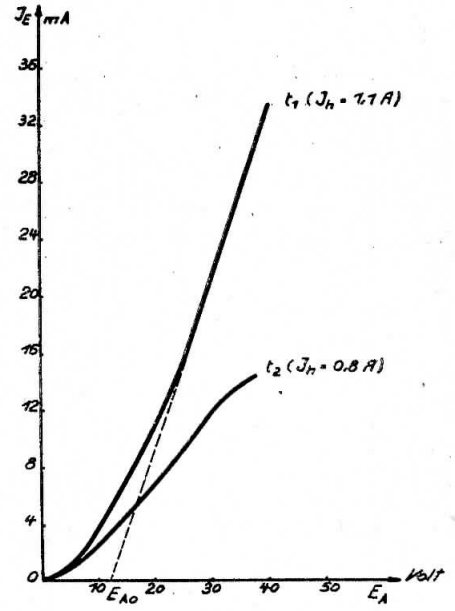
Pokazalo se da je kod katodnih cijevi najpovoljniji raspored elektroda (pa i najzgodniji za računanje) onda kad je nit za žarenje




Slika 55

ravna i opkoljena cilindričnom anodom. Anoda amplifikatorskih cijevi, koje rade sa malim energijama pravi se prvobitno od niklenog lima. Ako, između usijane niti i anode stavimo kod normalne temperature $t_1$ usijane niti, istosmjerni napon $E_A$ (— pol na katodu, + pol na anodu), koji postepeno raste, jakost elektronske struje $I_E$ ste prema gornjoj krivulji u sl. 56 najprije krivocrtno a zatim skoro u pravcu. Ako se uzme niža temperatura za usijavanje niti dobiva se blaža kriva.

Ako uzmemo različna mjesta na usijanoj niti kao polaznu točku, anodni napon na njima nema točno iste vrijednosti, pošto ova mjesta, uslijed pada napona na usijanoj niti koji nastaje uslijed struje grijanja, pokazuju uopće za više Volta različne potencijale. Po uobičajenom načinu spaja se plus pol baterije za grijanje sa minus polom anodne baterije. U tom slučaju plus pol niti za žarenje ima najmanji napon prema anodi a negativni kraj niti najveći. Dakle napon za grijanje iskorišćuje se djelomično kao anodni napon. U slijedećem principijelnom izlaganju nećemo uzimati u obzir pad



Slika 56

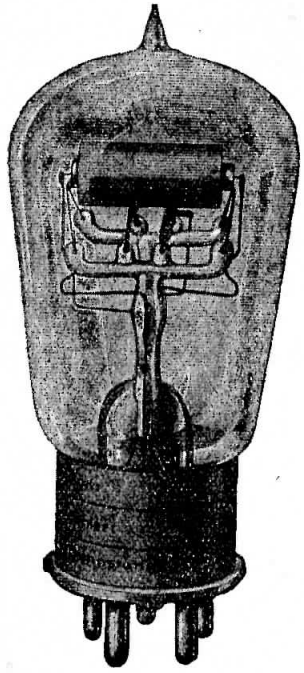
napona na usijanoj niti. Tok krivulja u sl. 56 uslovljen je važnom pojavom »prostornog naboja«. Elektroni, koji protječu u najbližoj okolini usijane niti stvaraju jedan gust, trajan i negativno nabijen oblak, koji se svakako sastoji iz elektrona, koji se neprestano mijenjaju. Prema zakonu da se električni naboji sa istim predznakom uzajamno odbijaju, elektroni, koji se već nalaze na putu ka anodi odbijaju u natrag jedan dio elektrona koji su s niti krenuli za njima. Tek kada bi privlačna sila pozitivno nabijene anode, postala tako velika uslijed sve većeg anodnog napona, da se potpuno savlada spomenuti efekat prostornog naboja, mogli bi svi elektroni, koje po zakonu Schottky-Richardson odašilje usijana nit dospjeti

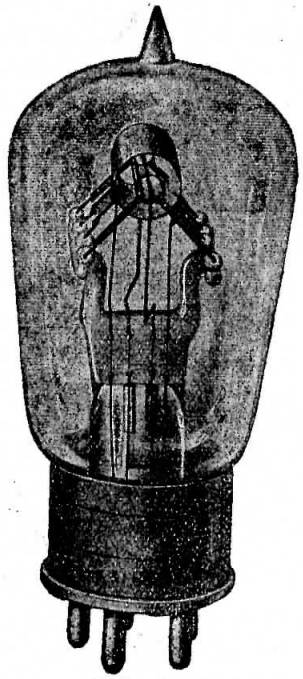


do anode. U praksi će na svaki način oksidna katoda kod normalne struje grijanja prije biti razorena.

Prema Amerikancu Langmuir-u, odn. prema profesoru Schottkyu, karakteristike prostornog naboja u slici 117 odgovaraju jednadžbi:

$$I_E = C \cdot E_A^{\frac{3}{2}} \tag{133}$$


Slika 57


Slika 58

U slučaju cilindričnog rasporeda elektroda sa unutrašnjim polumjerom $r$ anode, ako je pri tom duljina niti i anode $l$ imati ćemo:

$$I_E = C \cdot \frac{l}{r_A} \cdot E_A^{\frac{3}{2}} \tag{134}$$

Kod normalnog grijanja $C$ ima vrijednost $1{,}465 \cdot 10^{-5}$

Za približno pravocrtni dio karakteristike prostornog naboja biti će (sl. 117):

$$I_E \approx C \cdot (E_A - E_{A_0}). \tag{135}$$

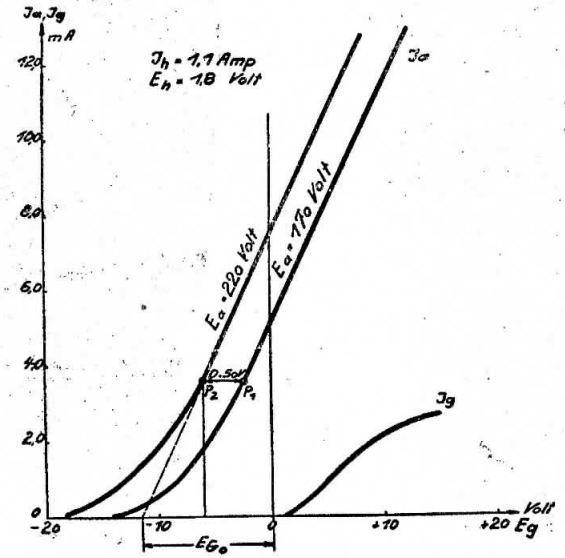
Ako se anodni napon poveća ili smanji za iznos $\Delta E_A$ iznositi će elektronska struja:

$$I_E \pm \Delta I_E \approx C \cdot [(E_A \pm \Delta E_A) - E_{A_0}]. \tag{136}$$

Kad se oduzme jedn. 135 od jedn. 136 dobivamo:

$$\Delta I_E \approx C \cdot \Delta E_A.$$

Promjena struje proporcionalna je promjeni napona, što potvrđuje srednji pravocrtni dio karakteristike prostornog naboja u sl. 56. Količnik $\frac{1}{C} = \frac{\Delta E_A}{\Delta I_E}$ (koji na svaki način zavisi o jačini struje grijanja oslanjajući se na Omov zakon, nazivamo »unutrašnji otpor« $R_i$ amplifikatorske cijevi. Ovaj otpor kod standardnih njemačkih cijevi, sa normalnim žarenjem katode, iznosi oko 20.000 Oma.




Slika 59

Amerikanac de Forest prvi je upotrijebio mrežicu na putu elektrona između katode i anode, svakako u drugom cilju a ne da postigne pojačanje.

Kod savremenih cijevi sa cilindričnim rasporedom elektroda mrežica je načinjena od žične spirale ili limenog cilindra ispresjecanog u uzdušnom pravcu. Ovakve mrežice smještaju se koncentrično sa niti. Slike 57 i 58 pokazuju njemačke standardne cijevi za amplifikatore.

Ako se mrežica metne na minus-pol istosmjernog napona čiji je plus-pol spojen sa minus-polom napona za grijanje i ako na taj način mrežica dobije negativni napon u odnosu prema niti, to će ona



odbijati negativne elektrone koji dolaze sa niti, dakle izvanredno će potpomagati gore opisani efekat prostornog naboja koji umanjuje anodnu struju. Što rešetka ima veći negativni napon, ona će to jače zaustavljati elektronsku struju i toliko će manje elektrona, prolazeći kroz mrežicu, dospjeti do anode. Lijeva krivulja u sl. 59 pokazuje odnose kod njemačkih standardnih cijevi koje rade sa anodnim naponom od 220 Volta.

Uvođenje ovog konstantnog napona na mrežici bio je Liebenov prijedlog od osnovnog značaja. Njegova amplifikatorska cijev bila je, kao što je već spomenuto napunjena živinom parom, a mrežica je bila nešto nepovoljnije namještena nego što je gore opisano.

Ako negativni napon mrežice iznosi 18 $V$ biti će elektronska struja sasvim zaustavljena. Što je anodni napon niži, to će jače biti izraženo djelovanje mrežice u pogledu gušenja elektronske struje i toliko će manje elektrona prolazeći kroz mrežicu doći do andode. Za izvjestan niži anodni napon dobiti će se druga krivulja ucrtana u sl. 59, koja će prema prvoj biti samo pomaknuta u desno za jedan određen iznos a imati skoro isti oblik. Na sličan način dobiva se karakteristika za veći anodni napon pomičući prvobitnu krivulju u lijevo.

U slijedećem kratkom razmatranju ćemo protumačiti ove pojave matematički:

Ako ne uzmemo u obzir slobodne elektrone, koji se nalaze između katode i anode, imati će anoda prema katodi kapacitet $C_A$ uslovljen samo njihovim geometrijskim rasporedom, a mrežni kapacitet prema katodi jeste $C_G$. Ako katoda ima potencijal 0, anoda potencijal $E_A$ mrežica $E_G$ to će, prema jedn. 92, na katodi biti

$$Q = -(c_A \cdot E_A + c_G \cdot E_G). \qquad (137)$$

vezana količina elektricitete.

Ako promijenimo potencijal anode $E_A$ za $\Delta E_A$ a istovremeno potencijal mrežice za $-\Delta E_G = -\Delta E_A \cdot \frac{c_A}{c_G}$, zadržati svoju prvobitnu vrijednost

$$\begin{aligned} Q &= -\left[c_A \cdot (E_A + \Delta E_A) + c_G \cdot \left(E_G - \Delta E_A \cdot \frac{c_A}{c_G}\right)\right] \\ &= -(c_A \cdot E_A + c_A \cdot \Delta E_A + c_G \cdot E_G - c_A \Delta E_A) \\ &= -(c_A \cdot E_A + c_G \cdot E_G). \qquad (138) \end{aligned}$$

Električni raspored silocrta u neposrednoj okolini katode i jakost elektronske struje ostaju nepromijenjeni. Ako u slici 59 pre-

đemo sa točke $P_1$, koja se nalazi na krivulji za $E_A = 170$ Volti, na točku $P_2$ za $E_A = 220$, koja ima istu ordinatu (jačinu) elektronske struje) to ćemo morati apscisu (napon mrežice) pomaknuti u smijeru negativnih vrijednosti za $\frac{c_A}{c_G} \cdot \Delta E_A = D \cdot -170$ V. Faktor proporcionalnosti $D = \frac{\Delta E_G}{\Delta E_A} = \frac{c_A}{c_G}$ koji je uslovljen jedino geometrijskim rasporedom, nazivamo »propustljivost«, jer on pokazuje u kojoj mjeri mrežica, uslijed električnog polja anode propušta elektrone koje odašilje katoda ($D \approx 0{,}07$ kod standardnih njemačkih cijevi). Što su manji otvori mrežice i što je mrežica bliža niti, t. j. što je veći kapacitet $C_G$, između njih to je propustljivost manja. U koliko je propustljivost veća u toliko je potrebno manje povećanje anodnog napona $\Delta E_A$ da se kompenzira jedno izvjesno povećanje negativnog mrežnog napona $-\Delta E_G = -D \cdot \Delta E_A$.

U amerikanskoj literaturi upotrebljava se mjesto pojma propustljivosti njena obrnuta vrijednost $\frac{1}{D}$ i ona se naziva »faktor pojačanja napona« (za njemačke standardne cijevi on iznosi oko 14,3). Što je ovaj faktor pojačavanja veći to se može kompenzirati veća promjena anodnog napona $\Delta E_A = \frac{1}{D} \cdot \Delta E_G$ jednom određenom promjenom napona na mrežici $-\Delta E_G$.

Zajedničko djelovanje potencijala mrežice i anode na jakost elektronske struje možemo zamisliti da je nastalo uslijed fiktivnog potencijala cilindrične površine mrežice

$$E_f = E_G + D \cdot E_A \tag{139}$$

pa će biti:

$$I_E = C \cdot \frac{l}{r_G} \cdot E_f^{\frac{3}{2}} \text{ (jedn. 134)}$$

$$= C \cdot \frac{l}{r_G} (E_G + D \cdot E_A)^{\frac{3}{2}} \tag{140}$$

ako $r_G$ znači polumjer mrežne površine.

Dok se nalazimo u oblasti negativnih mrežnih napona, do mrežice neće dospjeti ni jedan elektron koji šalje katoda uslijed spomenutog odbojnog djelovanja negativno nabijene mrežice, dakle neće biti nikakve struje u krugu sastavljenom od katode, mrežice i mrežne baterije. Ako prijeđemo na pozitivne napone mrežice koji rastu, mrežica će privlačiti sve veći dio $I_G$ elektronske struje $I_E$



na račun anode. Osim toga, pada otpor na dijelu katoda-mrežica, na konačnu vrijednost $\left(\frac{E_G}{I_G}\right)$ od jedne vrijednosti koja je prije toga bila beskonačno velika. Kako ćemo odmah vidjeti ove dvije pojave nisu korisne, kad hoćemo da upotrijebimo cijevi u cilju pojačanja. Ograničujemo se stoga na negativne mrežne napone i metnimo da je elektronska struja $I_E$ jednaka anodnoj struji koja dolazi na anodu:

$$I_A = C \cdot \frac{l}{r_G} \cdot (E_G + D \cdot E_A)^{\frac{3}{2}}. \tag{141}$$

Za približno pravocrtni dio karakteristike $E_G/I_A$ (sl. 59) bude:

$$I_A \approx S \cdot (E_G - E_{G_0} + D \cdot E_A). \tag{142}$$

Ako promijenimo $E_G$ za $\pm \Delta E_G$, biti će:

$$I_A \pm \Delta I_A \approx S\,[(E_G \pm \Delta E_G) - E_{G_0} + D \cdot E_A]. \tag{143}$$

Oduzimanjem jedn. 142 od 143 dobivamo:

$$\Delta I_A \approx S \cdot \Delta E_G, \tag{144}$$

što znači da je promjena anodne struje proporcionalna promjeni mrežnog napona. Konstantni količnik $S = \frac{\Delta I_A}{\Delta E_G}$ nazivamo »strmina« statičke karakteristike $E_G/I_A$ (za njemačke standardne cijevi ona iznosi $0{,}0007 \left(\frac{A}{V}\right)$. Što je karakteristika strmija to će veća promjena anodne struje odgovarati jednoj određenoj promjeni mrežnog napona.

Kad rezimiramo nalazimo da je:

Unutrašnji otpor $R_i = \frac{\Delta E^A}{\Delta I_A}$ (145)

Propustljivost $D = \frac{\Delta E_G}{\Delta E_A}$ (146)

Strmina $S = \frac{\Delta I_A}{\Delta E_G}$ (147)

Množenjem ovih triju jednadžba dobiva se interesantan rezultat:

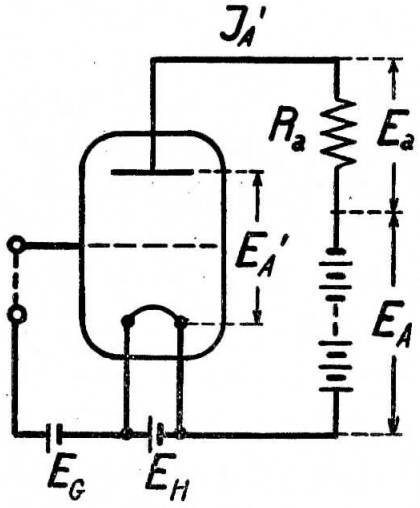
$$R_i \cdot D \cdot S = 1. \tag{148}$$

Ako su dvije karakteristične veličine jedne cijevi poznate može se treća odmah dobiti računski iz jedn. 148. Za njemačke standardne cijevi postoji odnos $R_i \cdot D \cdot S \approx 20.000 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}0007 \approx 1$.

Ako između anode i anodne baterije uključimo korisni otpor $R_a$ (slika 60), anodna struja $I'_A$, koja kroz njega protječe, prema Omovom zakonu izazivavlje u njemu pad napona $E'_A = R_a \cdot I'_A$. Između anode i katode ne djeluje više cio napon $E_A$ anodne baterije već napon $E'_A = E_A - E_a = E_A - R_a \cdot I'_A$ te će prema jedn. 142 biti:

$$I'_A \approx S \cdot (E_G - E_{G_0} + D \cdot E'_A) \qquad (149)$$

Ako se anodna struja poveća (smanjivanjem vrijednosti negativnog napona mrežice za $\Delta E_G$) za vrijednost $\Delta I'_A$ padne anodni



Slika 60

napon na $E''_A = E'_A - R_a \cdot \Delta I'_A$. Anodna struja biti će prema jedn. 143:

$$I'_A + \Delta I'_A \approx S \cdot [(E_G + \Delta E_G) - E_{G_0} + D \cdot E''_A]$$
$$= S \cdot [(E_G + \Delta E_G) - E_{G_0} + D\,(E'_A - R_a \cdot \Delta I'_A)] \qquad (150)$$

Oduzimanjem jednadžbe 143 od 144 dobivamo:

$$\Delta I'_A \approx S \cdot (\Delta E_G - D \cdot R_a \cdot \Delta I'_A)$$
$$\Delta' I_A\,(1 + S \cdot D \cdot R_a) \approx S \cdot \Delta E_G$$

$$\Delta I'_A \approx \frac{S \cdot \Delta E_G}{1 + S \cdot D \cdot R_a} = \frac{\Delta E_G}{D} \cdot \frac{1}{\frac{1}{S \cdot D} + R_a} = \frac{\Delta E_G}{D} \cdot \frac{1}{(R_i + R_a)} \text{ (jedn. 148)} \qquad (151)$$

Promjena energije $N_a = R_a \cdot I'^2_A$, koja se utroši u otporu $R_a$, iznosi:



$$\Delta N_a = R_a \cdot (\Delta I'_A)^2 \approx R_a \cdot \frac{\Delta E_A^2}{D^2} \cdot \frac{1}{(R_i + R_a)^2}. \qquad (152)$$

Ovaj izraz ima svoj maksimum za $R_a = R_i$*):

$$(\Delta N_a)_{\max} \approx \frac{\Delta E_G^2}{D^2} \cdot \frac{1}{4R_i} = \Delta E_G^2 \cdot \frac{1}{4D \cdot (D \cdot R_i)} = \Delta E_G^2 \frac{S}{4D} \qquad (153)$$

*) $\frac{d(\Delta N_a)}{dR_a} = \frac{\Delta E_G^2}{D^2} \frac{(R_i + R_a)^2 - 2R_a(R_i + R_a)}{(R_i + R_a)^4} = 0, \qquad (R_i + R_a) - 2R_a = 0,$

što se moglo i očekivati: Promjena napona između mrežice i katode proizvodi maksimalnu promjenu energije u vanjskom otporu anodnog kruga t. j. najveće djelovanje pojačavanja postiže se kad je vanjski otpor cijevi jednak unutrašnjem otporu. Dalje: Radi povećanja pojačanja treba težiti većoj strmini i manjoj propustljivosti. Smanjivanju propustljivosti (približavanju mrežice katodi) praktično je stavljena granica time što nit kod potresa i toplotnog rastezanja ne smije doći u dodir sa mrežicom. Dalje vidimo iz slike 59, da bi se pravocrtni dio karakteristike $E_G/I_A$ pomakao za nekoliko Volta u oblast, da je potrebno u toliko veće povećanje anodnog napona, u koliko je propustljivost manja. Kako ćemo odmah vidjeti, primorani smo da radimo s ovim pravocrtnim dijelom karakteristike i sa negativnim mrežnim naponima. S druge strane previše visoki naponi bili bi neprijatni; dakle sa smanjivanjem propustljivosti ne smije se previše daleko ići.

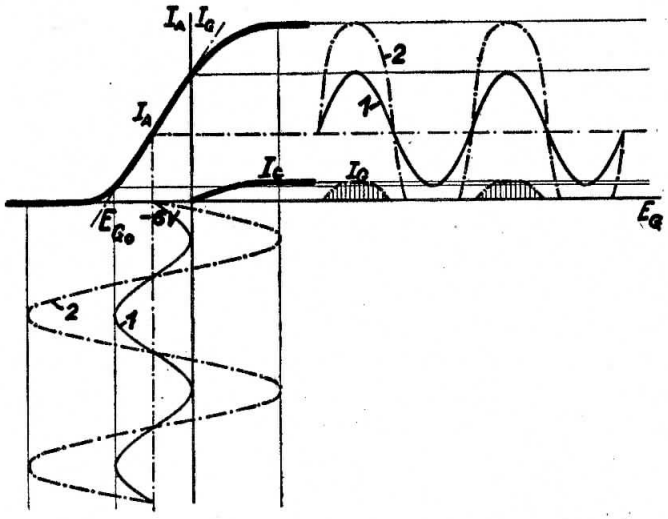
Kad se vanjski otpor prilagodi unutrašnjem otporu cijevi biti će:

$$\Delta I'_A \approx \frac{\Delta E_G}{D \cdot 2R_i} \text{ (jedn. 151)} = \frac{S}{2} \cdot \Delta E_G \text{ (jedn. 148)} \qquad (154)$$

t. j. poslije umetanja jednog prilagođenog korisnog otpora u anodni krug izazivlje jedna određena promjena mrežnog napona za pola manju promjenu anodne struje nego što to odgovara statičkoj karakteristici $R_G/I_A$ (jedn. 144). Ovaj odnos između $\Delta I'_A$ i $\Delta E_G$ predstavljen tako zvanom »dinamičkom« karakteristikom koja bi bila dva puta manje strma nego karakteristika anodne struje u sl. 59.

Poslije izvjesne veličine pozitivnog napona mrežice nikakvo njegovo dalje povećanje ne bi moglo izazvati porast anodne struje, pošto bi smanjivanje anodnog napona kompenziralo prirast napona mrežice uslijed pada napona na vanjskom otporu. Dinamička karakteristika $E_G/I_A$ prelazi, dakle, u horizontalni pravac (sl. 61). Sada ćemo na osnovi izloženih principa, govoriti o djelovanju pojačavanja

katodnih cijevi sa visokim vakumom na izmjenične napone mrežnog kruga. Počinjući od jednog srednjeg negativnog mrežnog napona — $E$ kome odgovara srednja anodna struja (sl. 61), smanjujemo vrijednost mrežnog napona. U tom slučaju povećati će se anodna struja za vrijednost uslovljenu oblikom dinamičke karakteristike $E_G/I_A$ i to bez ikakvog usporavanja, pošto elektroni sa ogromnom brzinom prelaze put od katode do anode. Povećanje mrežnog napona prouzrokuje odgovarajuće opadanje anodne struje. Dok se nalazimo na pravocrtnom dijelu karakteristike $E_G/I_A$ promjene



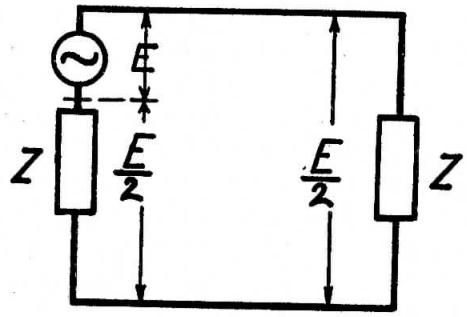

Slika 61

anodne struje proporcionalne su promjenama mrežnog napona, kao što smo to već vidjeli. Kakvom bilo toku promjena mrežnog napona odgovara proporcionalni neusporeni tok promjena anodnog napona, kao što je to predočeno u sl. 61 za vremensku promjenu izmjeničnog sinusnog napona na mrežici i njemu odgovarajuće istosmjerne struje između usijene niti i anode, koja se mijenja u obliku sinusoide (izvučena krivulja 1). Prvi uslov da promjene anodne struje budu vjerna reprodukcija promjena mrežnog napona jeste, da se ne izađe iz ravnocrtnog dijela dinamičke karakteristike $E_G/I_A$ kao što je spomenuto. S toga ćemo izabrati mrežni napon tako, da padne otprilike u sredinu ovoga dijela krivulje (što od prilike odgovara donjoj točki koja od ravnocrtnog dijela statičke karakteristike od-

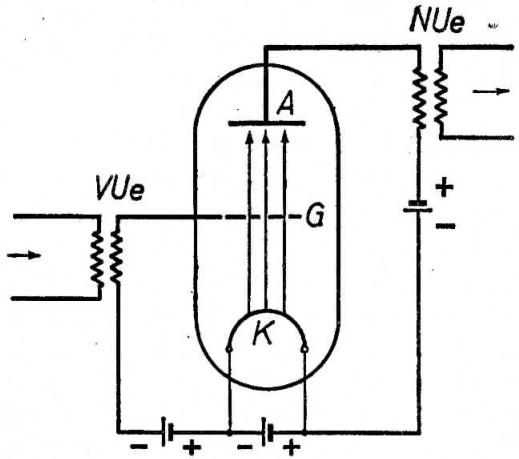


sijeca jednu trećinu; kod njemačkih standardnih cijevi za amplifikatore iznosi mrežni napon — 6 Volta).

U tom slučaju mogu se mrežnom krugu utisnuti amplitude napona do 6 Volta t. j. efektivni naponi od $\frac{6}{\sqrt{2}} \approx 4{,}2$ Volta, a da mrežni potencijal ne dostigne nultu vrijednost. Slika 61 pokazuje,




Slika 62




Slika 63

osim toga, da se sa ovim amplitudama mrežnog napona ne izlazi iz ravnocrtnog dijela karakteristike $E_G/I_A$ pa amplifikatorska cijev nije preopterećena.

Koliko je neiskrivljeno pojačanje izmjenične struje koje se može postići jednom amplifikatorskom cijevi čije su karakteristične vrijednosti $R_i$, $D$ i $S$ dane? Pojačanjem energije $\alpha^2$ nazivamo odnos energije izmjenične struje $N$ koju amplifikator šalje u liniju i one

energije $N_0$ koju ova linija (sa vanjskim otporom Z) prima bez umetanja amplifikatora. Dolazeća telefonska linija sa jednakim valnim otporom (unutrašnjim otporom) $Z$ nosilac je izmjenične elektromotorne sile $E$; polovina napona potroši se na unutrašnjem otporu $Z$ a druga polovina na vanjskom otporu Z (sl. 62). Na ovaj posljednji otpor (koji predstavlja odlazeću liniju) prenosi se energija izmjenične struje:

$$N_0 = \frac{\left(\frac{E}{2}\right)^2}{Z} = \frac{E^2}{4Z} \tag{155}$$

Kad se u telefonsku liniju umetne amplifikator, onda se dolazeći slabi izmjenični naponi govornih struja dovode preko ulaznog translatora *VUe* na mrežni krug amplifikatorske cijevi, a pojačana izmjenična energija $N$ uzima se iz anodnog kruga opet pomoću izlaznog translatora *NUe* (sl. 63). Prividni otpor namotaja izlaznog translatora, koji leži u anodnom krugu, prilagođen je unutrašnjem otporu cijevi $R_i$ radi postignuća što je moguće većeg pojačavalačkog djelovanja za frekvenciju izmjenične struje koja se pojačava. Isto tako prilagođeni su prividni otpori namotaja translatora koji leže u dolaznoj i odlaznoj liniji valnom otporu linije $Z$. Na važnost prilagođenja prividnih otpora ulaznog i izlaznog translatora prvi je upozorio Francuz Latour. U novije vrijeme namataju se završni translatori raznih stvarnih i fantomnih krugova tako, da prividni otpori svih strujnih krugova budu transformirani na isti primarni prividni otpor. Ostalo o prilagođivanju prividnog otpora kod načina spajanja amplifikatora u telefonske linije naći će čitalac u odjeljku 10.

Da se sačuva željezna jezgra izlaznog translatora od prethodnog magnetiziranja istosmjernom anodnom strujom iz praktičnih se razloga radi tako, da se anodni istosmjerni napon dovede na anodu preko ovojnice za gušenje *Dr* i da se primarni namotaj izlaznog translatora odvoji od anode pomoću jednog kondenzatora $K_0$ (vidjeti sl. 66 i 67). Pojačana izmjenična govorna struja prolazi nesmetano kroz ovaj kondenzator; ovojnica za gušenje spriječava preslušavanje, koje bi moglo nastati, kad bi govorne struje preko zajedničkih dovodnih linija anodnog napona prešle i na ostale pojačane govorne krugove.

Kad je mrežni napon negativan, onda je, kao što je spomenuto, beskonačno veliki otpor istosmjerne struje na putu od katode do mrežice a otpor izmjenične struje, uslijed kapaciteta između katode i mrežice (koji ima veličinu 50 do 100 μμF), iznosi za 800 Herca samo



2 do 4 megoma. Prividni otpor namotaja ulaznog translatora, koji leži u mrežnom krugu treba da je što bliži prividnom otporu kapaciteta između katode i mrežice za ona titranja koja treba pojačati. Međutim vlastiti kapacitet mrežnog namotaja stavlja granicu ovoj težnji izjednačenje prividnih otpora. Ipak, za vlastitu frekvenciju rezonancije translatora prividni otpor mrežnog namotaja koji se postiže iznosi okruglo 1 megom, te se može, dakle, pogodnim dimenzioniranjem translatora prilagoditi da se vlastita frekvencija rezonancije podudara sa frekvencijom koju treba pojačati. U tom će slučaju biti za ovu frekvenciju izmjenični napon na mrežici:

$$E_G = \frac{E}{2}\sqrt{\frac{R_{s_2}}{R_{s_1}}} = \frac{E}{2}\sqrt{\frac{10^6}{Z}}, \tag{156}$$

a energija koja se prenosi na izlazni translator, u slučaju prilagođavanja otpora, biti će po jedn.:

$$N_{a_{\max}} \approx E_G^2 \frac{S}{4D} = \frac{E^2}{4} \cdot \frac{10^6}{Z} \cdot \frac{S}{4D} \tag{157}$$

Ako stupanj djelovanja izlaznog translatora označimo sa $\eta$ to će energija koju prima odlazeća telefonska linija iznositi:

$$N = \eta \cdot N_{a_{\max}} \approx \frac{E^2}{4Z} \cdot \frac{\eta S}{4D} \cdot 10^6 \tag{158}$$

a pojačanje energije iznosi:

$$k^2 = \frac{N}{N_0} \approx \frac{\eta \cdot S}{4D} \cdot 10^6 \text{ (jedn. 155)} \tag{159}$$

Slično definiciji gušenja uobičajeno je u tehnici amplifikacije računati sa linearnim pojačavanjem, drugim korjenom iz pojačanja energije, pa se kao pojačanje označuje $s = \ln k \approx$ (u najtvornijem slučaju) $\ln \sqrt{\frac{\eta \cdot S}{4D} 10^6} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{\eta \cdot S}{4D} \cdot 10^6 \right)$. (160)

Ako se telefonska linija sastoji iz više amplifikatorskih polja (sekcije kabela između dvije amplifikatorske stanice) i dva završna polja sa gušenjem $b_1$, $b_2$, $b_3$ ... i uključenim amplifikatorima sa pojačanjima $s_1$, $s_2$, $s_3$ ... onda je rezultirajuće gušenje linije, tako zvani ekvivalent prenosa (ili preostalo gušenje):

$$b_r = (b_1 + b_2 + b_3 \ldots) - (s_1 + s_2 + s_3 \ldots). \tag{161}$$

Ako se prividno jednaka gušenja $b$ svakog od $n$ polja poništavaju sa pojačanjem $s$ amplifikatora koji su uključeni na kraju svakog polja dobivamo:

$$b_r = \mathrm{n} \cdot b - (\mathrm{n} - 1) \cdot s = b. \tag{162}$$

Dakle ekvivalent bi bio jednak gušenju jednog jedinog amplifikatorskog polja, nezavisno od broja polja $n$. Gušenje se može u praksi još više smanjiti. Kao što ćemo vidjeti u odjeljku 10 ograničen je, s druge strane, kod dvožičnog rada broj amplifikatora koji se mogu jedan za drugim spajati u liniju.

Za jednocijevni amplifikator snabdjeven sa jednom njemačkom standardnom cijevi iznosi:

$$k^2 = \frac{0{,}7 \cdot 0{,}0007}{4 \cdot 0{,}07} \cdot 10^6 \text{ (jedn. 159)} \approx 1750$$

$$k \approx 42$$

$$s \approx 3{,}7 \text{ Nepera.}$$

Ako se, nasuprot dovedu na mrežicu tako visoki izmjenični naponi, da pozitivni vrhovi napona dođu u oblast pozitivnog potencijala mrežice, tada će, za to vrijeme, pozitivna mrežica, koja leži prema katodi, i sama privlačiti elektrone. Nastaje struja u mrežici pa razmak katoda-mrežica više ne pokazuje beskonačno veliki otpor on može biti tako malen da bude dosta niži od prividnog otpora sekundarnog namotaja ulaznog translatora. U tom je slučaju ulazni translator loše prilagođen mrežnom krugu, pa djelovanje pojačavanja pada za pozitivne vrhove napona; vrhovi anodne struje bivaju izravnani. Gubi se proporcionalnost između promjena anodne struje i mrežnog napona, a razumije se pada i ukupno pojačanje. Promijenjenom obliku krivulje odgovara pojav novih djelomičnih titranja u krivulji anodne struje. Ako na mrežni krug djeluje napon koji se mijenja pod utjecajem govora, onda će, uslijed promijenjenog oblika krivulje anodne struje, preneseni govor biti iskrivljen, uslijed čega će razumljivost biti slabija. Kod katodnih cijevi sa oksidnom niti mrežna se struja javlja tek kod napona mrežice od 1 Volta tako, da amplitude promjena mrežnog napona mogu iznositi 7 Volta.

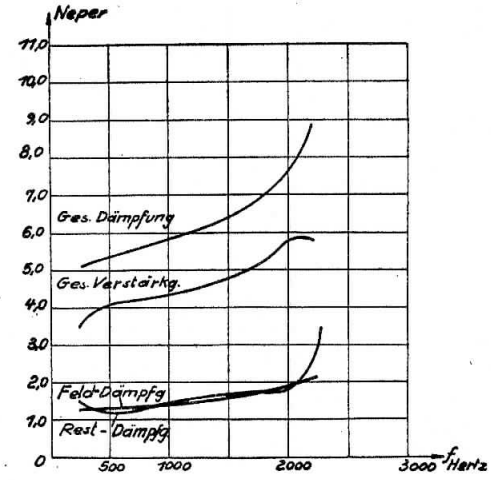
Još ozbiljnija distorzija dobiva se kad se na mrežicu metnu tako visoki izmjenični naponi, da se u većoj mjeri prijeđe ravnocrtni dio dinamičke karakteristike $E_G/I_A$ tako, da napokon anodna struja dostigne svoju maksimalnu vrijednost odn. vrijednost nulu (u sl. 61 predočeno krivuljom nacrtanom crticama i točkama). Dalje povećanje mrežnog potencijala pomoću maksimalnih pozitivnih vrijednosti mrežnog napona ne može izazvati nikakvo povećanje anodne struje iznad njene maksimalne vrijednosti. Dalje pak smanjivanje mrežnog potencijala pomoću maksimalnih negativnih vrijednosti mrežnog napona ne može dati drugi pravac anodnoj struji već je može samo držati na nultoj vrijednosti. U točkama maksimuma odn.



minimuma odgovaraju izravnani oblici krivulje anodne struje kako pozitivnim tako i negativnim maksimalnim vrijednostima mrežnog napona. Faktično, tako zvani ravnocrtni dio karakteristike $E_G/I_A$ nije apsolutno ravnocrtan pa nije isključeno da uslijed toga, na vrlo dugim linijama sa velikim brojem amplifikatora ukopčanih u red jedan za drugim, nastanu distorzije prenesenog govora, iako su kod pojedinih amplifikatora minimalna udaljivanja od proporcionalnosti između promjena napona na mrežici i promjena anodne struje. To bi bila smetnja, kao i ona koja je opisana u odjeljku 3, uslijed nelinearne distorzije (distorzije treće vrste) koja se uhom opaža kao zvrčanje.

## 8. ANTIDISTORZIJA AMPLITUDA

U odjeljku 1 i 2 vidjeli smo, da sve vrste telefonskih kablova, iako u različitoj mjeri, gorje prenose više frekvencije čovječjeg govora nego niže. To je tako zvana distorzija amplituda ili distor-

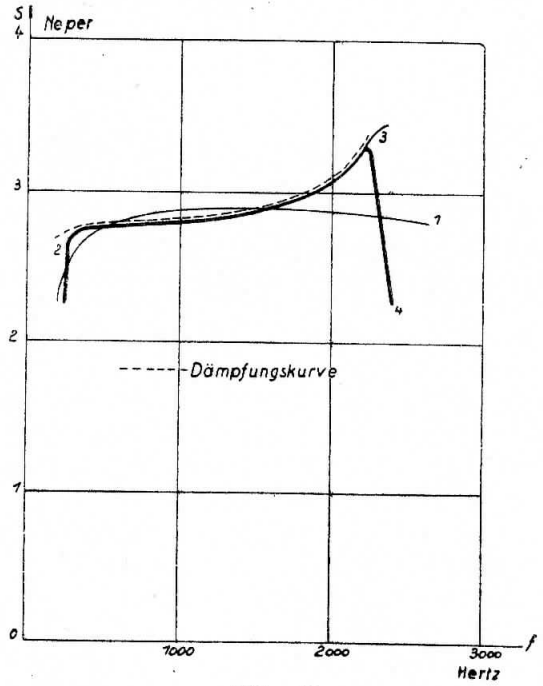



Slika 64

zija prve vrsti. Pupinovi kablovi stoje u ovom pogledu najbolje. Kod normalnog pupiniziranja javlja se razlika u jakosti glasa od $\Delta b \approx 1$ Neper između frekvencije 300 i 2000 Herca tek na 200 km. duljine; ova razlika ne utječe ni malo na razumljivost.

Ali, ako imamo normalno pupinizirani kabel sa promjerom žila 1,4 mm dug na pr. 560 km. vidjeti ćemo da se ukupno gušenje za

frekvencije od 300 do 2000 Herca penje od 5,2 do 7,5 Nepera (sl. 60, $b$ = 5,6 Nepera za srednju govornu frekvenciju od 800 Herca). Umetanjem triju amplifikatora od kojih svaki ima pojačanje s=1,4 Nepera snizit ćemo ekvivalent prenosa za frekvenciju 800 Herca na 1,4 Nepera. Kad bi upotrijebili amplifikatore koji pojačavaju u istoj mjeri titranja u oblasti važnih govornih frekvencija, onda bi iznosio ekvivalent za 300 Herca 5,2—4,2=1,0 Nepera a za 2000 Herca



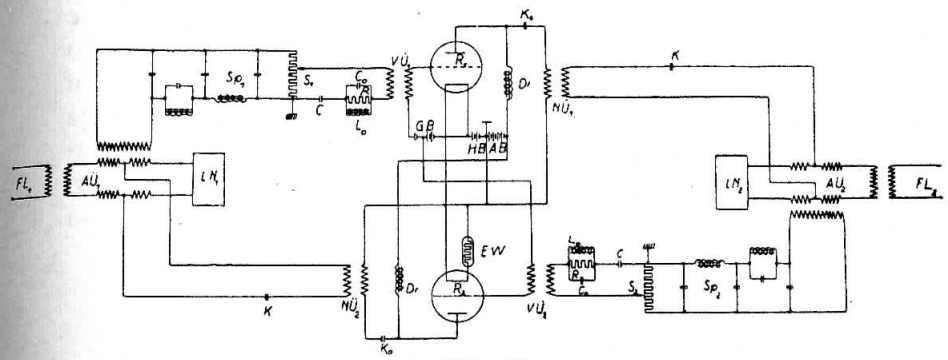

Slika 65

7,5—4,2 = 3,3 Nepera. Preneseni govor izgledao bi tup uslijed veće jakosti nižih frekvencija. Previše veliki ekvivalent viših frekvencija važnih za artikulaciju utječe štetno na razumljivost. Prema tome se u telefoniji na većim udaljenostima, kada se radi sa više amplifikatora, moraju preduzeti naročite mjere da spomenuta distorzija bude što manja.

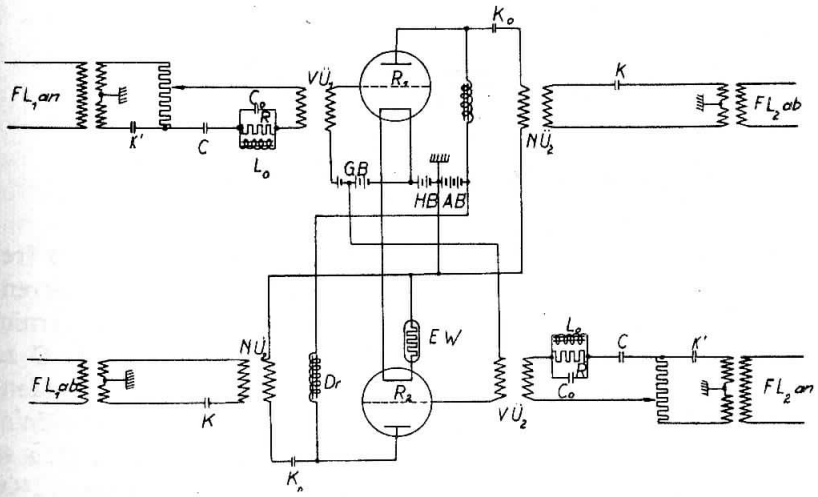
U slici 65 isprekidana krivulja predstavlja promjenu gušenja u ovisnosti o frekvenciji između dva amplifikatora za četverožičnu telefoniju jednog pupiniziranog kabela (140 km normalno pupiniziranog normalnog njemačkog kabela sa promjerom žila 0,9 mm).



Da složimo krivulju pojačavanja sa krivuljom gušenja iskoristiti ćemo najprije okolnost što i gušenje i pojačavanje u oblasti frekvencija koje nas interesiraju osjetno rastu, ako se vlastita frekvencija ulaznog translatora zgodnim dimenzioniranjem tako udesi



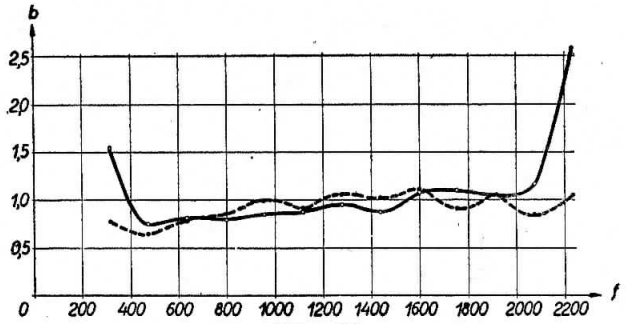
Slika 66



Slika 67

da dođe u gornju oblast važnih govornih frekvencija (krivulja 1 u sl. 65). Vlastita frekvencija je ovisna o raspoređenom kapacitetu sekundarnog namotaja a on je sam ovisan o kapacitetu sekundarnog namotaja prema primarnom i prema zemlji. Da odnosi budu nezavisni o slučajnosti pri fabrikaciji spajaju se sa zemljom jezgra i poklopac translatora kao i jedna točka primarnog kruga (sl. 66 i 67). Dalje prilagođivanje krivulje pojačavanja vrši se prema Latour-u i

drugima pomoću dopunskih elemenata u amplifikatoru. U tom slučaju postiže se kod amplifikatora sa jednom cijevi pojačanje 2,8 Nepera za srednju govornu frekvenciju od 800 Herca. Spomenuti dopunski elementi nalaze se u šemi amplifikatora za dvožičnu telefoniju (sl. 66) i u šemi amplifikatora za četverožičnu telefoniju sl. 67) gdje su uključeni ispred ulaznog translatora. Prva je namjera da se malo podigne krivulja pojačana za niže govorne frekvencije. Ovo se postiže pomoću kondenzatora C vezanog u red sa primarnim namotajem ulaznog translatora koji za ove frekvencije predstavlja induktivni prividni otpor. Ovdje ćemo imati slučaj rezonancije napona. Djelomični naponi na krajevima namotaja translatora veći su nego ukupni napon (krivulja 2 u sl. 66). To isto treba uraditi i sa višim govornim frekvencijama.



Slika 68

Ulazni translator predstavlja kapacitivan prividni otpor za frekvencije koje su iznad njegove vlastite frekvencije; za ove frekvencije samoinduktivna ovojnica $L_0$, koja je vezana u red sa primarnim namotajem translatora, igra sličnu ulogu kao i kondenzator C za niske frekvencije (krivulja 3). Paralelno sa $L_0$ veže se još i kondenzator $C_0$ čime se dobiva oscilatorni krug sa maksimalnim prividnim otporom (rezonancija struje) za vlastitu frekvenciju kruga. Ona se uzima nešto iznad granice pojasa frekvencije koje se prenose (2400 —2500 Herca). Prema tome, krivulja pojačanja u ovoj oblasti frekvencija opet se spušta (krivulja 4). Napokon paralelno vezani otpor R regulira strminu krivulje rezonancije, t. j. kretanje krivulje pojačanja u ovinosti o frekvenciji.

Slika 64 pokazuje djelovanje ovih dopunskih elemenata na Pupinov kabel dug 560 km sa vodovima promjera 1,4 mm i tri uključena amplifikatora za dvožičnu telefoniju. Ne uzimajući u obzir sitna nepodudaranja, postignuta je ista distorzija kao i u jednom jedinom



amplifikatorskom polju koje je u ovom slučaju dugo 140 km. ($\Delta b_r$ = 0,6 Nepera za frekvencije od 300 do 2000 Herca).

Slika 68 pokazuje rezultat na četverožičnoj telefonskoj liniji Berlin—Amsterdam—London dugoj 1400 km. Potpuna antidistorzija postignuta je praktično do 2100 Herca. Kod lako pupiniziranih četverožičnih linija (odjeljak 10) postignuta je horizontalnost krivulje ekvivalenta prenosa sve do 3200 Herca.

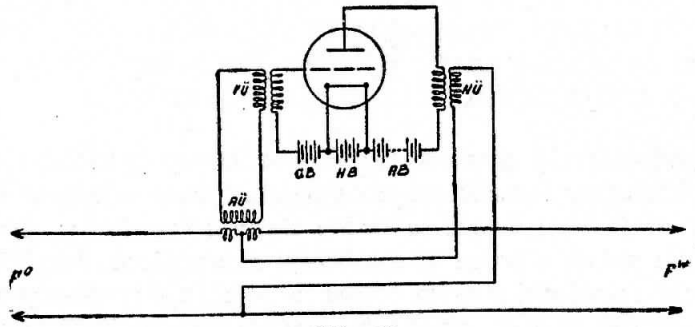
Amerikanci (iz razloga koji će se navesti u slijedećem odjeljku) vrše kod amplifikatora za dvožičnu telefoniju neznatnu antidistorziju amplituda, pa kad imaju više amplifikatora vezanih u red dobivaju ekvivalent koji jako raste sa frekvencijama.

## 9. NAČINI VEZIVANJA AMPLIFIKATORA. DVOŽIČNA I ČETVEROŽIČNA TELEFONIJA. DISTORZIJA USLJED POVRATNE SPREGE. PRESLUŠAVANJE I ZAVISNOST OD TEMPERATURE DUGIH LINIJA SNABDEVENIH AMPLIFIKATORIMA

Najjednostavniji amplifikator, koji se sastoji iz katodne cijevi, ulaznog i izlaznog translatora, može pojačati samo u jednom pravcu i to one struje koje dolaze sa strane ulaznog translatora. Govorne struje koje dolaze s druge strane bivaju zaustavljene. Amplifikator se ne može primijeniti u ovom obliku za pojačanje razgovora u obadva pravca koji se vodi između dva pretplatnika po liniji sastavljenoj od dva voda (ili iz dva para koji zajedno čine fantomni krug). Moglo bi se pokušati, da se i druga linija veže još i na ulazni translator a prva naizlazni, da se postigne pojačanje i u suprotnom pravcu. Međutim rezultat bi bio sasvim drugi. I najmanja struja koja bi dolazila s desna bila bi pojačana, pa bi djelovala ponovo na rešetku i bila još jednom pojačana. Tako bi to išlo u krugu sve dalje dok bi cijev mogla davati energije. Cijev »zviždi« kako se to kaže, u uši pretplatnicima i onemogućava svako sporazumijevanje. Visina tona zviždanja određena je vlastitom frekvencijom amplifikatora, na pr. vlastitom frekvencijom ulaznog translatora; cijev daje stalno novu energiju da se održe slobodne oscilacije oscilatornog kruga.

Mora se, dakle, spriječiti da jednom pojačana struja ne može više djelovati na ulaz amplifikatora. U ovom cilju treba prije svega amplifikator uključiti na liniju preko naročitog, diferencijalnog, translatora *AÜ* (sl. 69). Ovaj će prenositi dolazeće slabe struje na ulaz amplifikatora, a pojačane struje, pošto prolaze kroz jednake polovine primarnog namotaja diferencijalnog translatora u suprot-

nim pravcima, neće ga magnetizirati u slučaju kad su prividni otpori lijeve i desne linije međusobno jednaki. Obadva dijela linije $F_O$ i $F_W$ moraju imati iste prividne otpore za sve izmjenične struje koje se pojačavaju. Takav amplifikator mora biti namješten točno u sredini između dvije samoinduktivne ovojnice, da prividni otpori priključenih linija, bar teoretski imadu isti tok u ovisnosti o frekvenciji (odjeljak 2). Razilaženja krivulje prividnog otpora od njenog teoretskog oblika, ćemu se ne može izbjeći, spriječava kod jačeg pojačanja, postignuće zadovoljavajuće ravnoteže. Iako se zviždanju može izbjeći, ipak razilaženja od jednakosti prividnih otpora dolazne i odlazne linije za čitav niz frekvencija prouzrokuju slabije povratne struje istih frekvencija. Titranja ovih frekvencija biti će



Slika 69

dakle, u naročitoj mjeri pojačana te će se na mjestu prijema isticati iznad ostalih. Ova distorzija povratne sprege ili distorzija četvrte vrste daje prenesenom govoru izvjestan metalni prizvuk. Izvjesne frekvencije naročito otskaču od drugih, a kad nesimetrija između linija bude još veća, nastati će zviždanje u visini jedne od ovih frekvencija.

Uslijed toga ovi t. zv. »amplifikatori sa jednom cijevi« primjenjuju se u Njemačkoj samo u okružnim mrežama, gdje se pomoću njih omogućuje pojačanje oko 1 Nepera. Za daljinsku telefoniju cio uređaj za amplifikator sa jednom lampom podvostruči se, kao što pokazuje slika 62, a za prividne otpore linija $FL_1$ i $FL_2$ načine se umjetne linije $LN_1$ i $LN_2$ kombinacijom otpora, kondenzatora i eventualno ovojnica. Lijevi diferencijalni translator $AÜ$ dovodi slabe govorne struje, koje dolaze sa lijeve linije $FL_1$ do ulaznog translatora $VÜ_1$ gornje katodne cijevi $R_1$, koja ih preko izlaznog translatora šalje na odlazeću telefonsku liniju $FL_2$. Slabe govorne struje,



koje dolaze s desna, prelaze preko desnog diferencijalnog translatora $AÜ_2$ i dolaze na rešetku donje cijevi $R_2$. Opisani amplifikator sa dvije cijevi ili, kako se drukčije kaže, amplifikator za dvožičnu telefoniju, ima za svaki govorni pravac posebnu katodnu cijev i dvostruku sigurnost protiv zviždanja, jer postoje dvije električne skretnice koje moraju biti nesimetrične za istu frekvenciju da se zatvori krug povratne sprege.

Napon na rešetki svake amplifikatorske cijevi treba da bude — 6 Volta u odnosu prema negativnom kraju usijane niti. Kao što pokazuje sl. 66 i 67 niti obiju cijevi vezane su u red radi grijanja. Napon za mrežicu prve cijevi $R_1$ uzima se sa minus pola mrežne baterije *GB*, koja se sastoji iz tri akumulatorske stanice, plus pol ove baterije spojen je sa minus polom baterije za žarenje *HB*. Negativni kraj niti druge amplifikatorske cijevi $R_2$ ima uslijed pada napona, koji iznosi oko 2 Volta, na niti cijevi $R_1$ za odgovarajuću vrijednost veći potencijal prema točki — *HB*|+*GB*. Stoga se uzima napon za rešetku cijevi $R_2$ iza drugog akumulatorskog članka rešetkine baterije, da se i kod ove cijevi dobije potreban napon od — 6 Volta između rešetke i negativnog kraja niti.

Razumije se samo po sebi, da sa opisanim amplifikatorom za dvožičnu telefoniju nije više moguće postići pojačanje od 2,6 Nepera (odjeljak 10) za srednje govorne frekvencije. Radi približnog računanja možemo pretpostaviti, da na ulaznoj strani kroz prvu polovinu primarnog namotaja diferencijalnog translatora prolazi sva dolazeća govorna struja, da u drugoj polovini praktično nema struje uslijed suprotne sprege obadviju namotaja, dok se ostatak struje gubi u izlaznom krugu druge cijevi, koji je vezan paralelno sa umjetnom linijom dolazne linije. Dakle, u diferencijalnom translatoru djeluje samo polovina ukupnog napona. Ovome gubitku napona (= gubitku energije) odgovara dopunsko gušenje $b' = \ln = \sqrt{2} \approx 0{,}35$ Nepera. Ako stavimo da je stepen djelovanja diferencijalnog translatora $\eta = 80—85\%$, gubitci u translatoru izazivati će jedno dalje dopunsko gušenje $b'b'' = \ln \frac{1}{\sqrt{\eta}} \approx 0{,}1$ Nepera. Dakle, na ulaznoj strani imamo ukupno dopunsko gušenje $b' + b'' \approx 0{,}45$ Nepera. — Na izlaznoj strani gubi se polovina energije u umjetnoj liniji, što odgovara dopunskom gušenju od 0,35 Nepera. Gubitci u diferencijalnom translatoru iznose opet 0,1 Nepera. Prema tome, pojačanje našeg amplifikatora za dvožičnu telefoniju pada ukupno za $\Delta s \approx 2 \cdot 0{,}45 = 0{,}9$ Nepera i iznosi $s \approx 1{,}9$ Nepera za 800 Herca.

— Kod amplifikatora za zračne linije sa manjom antidistorzijom mogu se, naravno, postići veća pojačanja za srednje govorne frekvencije.

Kod amplifikatora za dvožičnu telefoniju treba da je po internacionalnim propisima moguće reguliranje pojačanja u stupnjevima od $\Delta s \leq 0{,}2$ Nepera. U Njemačkoj se prakticira ovo reguliranje u stupnjevima od $\Delta s = 0{,}1$ Nepera. Ono se postiže pomoću dva potenciometra ($s_1$ i $s_2$) koji se spajaju ispred ulaznih translatora (sl. 66), što znači bez promjene ulaznog prividnog otpora amplifikatora.

Pošto se amplifikatori često postavljaju na mjestima gdje pupinizirani kabel prelazi u zračne linije ili u Krarupkabel spomenuti ćemo ovdje, radi potpunosti, metodu Amerikanca Noyt-a za određivanje umjetne linije za zračne linije ili za Krarup-kablove veće duljine. Valni otpor telefonske linije, kad se zanemari odvod i kad je $R \ll \omega L$ (što je slučaj kod zračnih linija i Krarup-kablova iznosi:

$$3 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \sqrt{1+\frac{R}{j\omega L}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \left(1+\frac{R}{2j\omega L}\right)$$

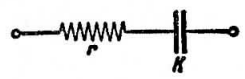
$$= \sqrt{\frac{L}{C}} + \frac{R}{2j\omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = r + \frac{1}{j\omega K} \qquad (163)$$

Umjetna linija sastoji se dakle, iz otpora $r = \sqrt{\frac{L}{C}}$ i kapaciteta $K = \frac{2\sqrt{L \cdot C}}{R}$ (sl. 70) koji su vezani u red.

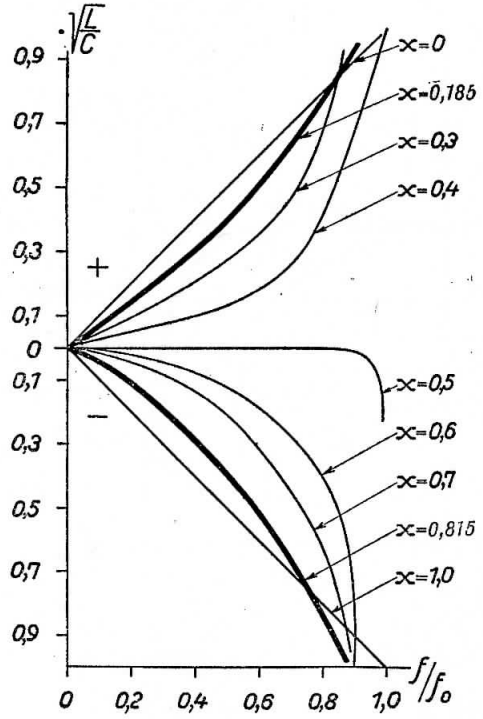
Prve metode određivanja umjetnih linija u pogledu reprodukcije prividnog otpora pupinizirane linije osnivale su se na činjenici, da prividni otpor u izvanrednoj mjeri zavisi od udaljenosti prve ovojnice od početka linije (mi smo do sad promatrali samo normalni slučaj da pupinizirana linija počinje sa polovinom normalnog razmaka Pupinovih ovojnica). U slici 71/72 apscise znače odnos $\eta$ promatrane frekvencije $f$ prema graničnoj frekvenciji $f_0$ Pupinove linije, ordinate predočuju odnos prividnog otpora prema vrijednosti $\sqrt{\frac{L}{C}}$ za niže frekvencije, i to slika 67 znači realnu a sl. 68 imaginarnu komponentu prividnog otpora. Parametar $x$ pojedinih krivulja prividnog otpora predstavlja odnos duljine početnog polja prema duljini polja s između ovojnica. Na debelo izvučenim krivuljama vidimo da se duljina početnog polja 0,185 s i 0,815 s odlikuje time što je realna komponenta prividnog otpora u oblasti važnih govornih frekvencija nezavisna od frekvencija. Imaginarna kompo-



nenta prividnog otpora raste sa rastućom frekvencijom u prvom slučaju induktivno a u drugom slučaju kapacitivno. Prva poznata umjetna linija (Hoyt-ova) reproducira (sl. 73) Pupinovu liniju koja počinje sa duljinom početnog polja 0,185 s pomoću otpora $R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$




Slika 70

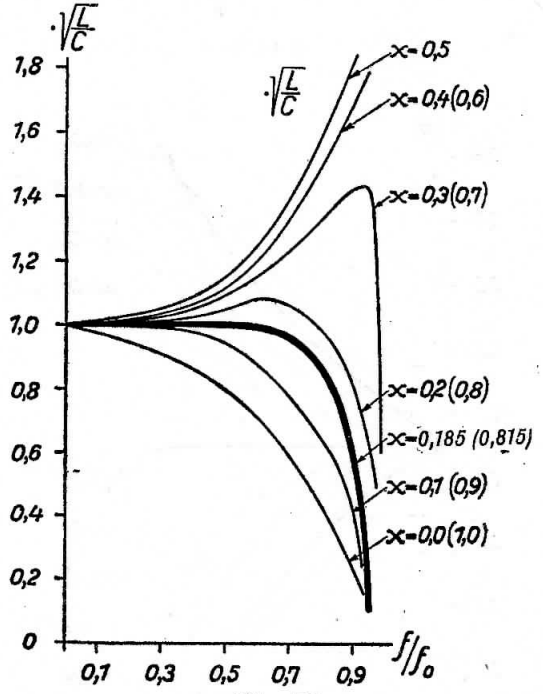



Slika 71

(realna komponenta prividnog otpora) i pomoću oscilatornog kruga vezanog u red koji se sastoji iz samoindukcije $L_0 = 0{,}339\ L$ i kapaciteta $C_0 = 0{,}382\ C$ ($L$ i $C$ znače vrijednosti samoindukcije i kapaciteta ovojnica zajedno sa kabelom za jedno polje). Pošto je u praksi duljina početnog polja jednaka to se kapacitet preostale duljine reproducira pomoću paralelno spojenog kondenzatora $K = 0{,}315\ C$. Radi točne reprodukcije potreban je i kondenzator $C_1$ vezan u red

koji reproducira imaginarnu komponentu prividnog otpora za niske frekvencije pupinizirane linije koja ima gubitak (vidjeti sl. 6). Ovaj kondenzator služi osim toga i za reprodukciju povećanja imaginarne komponente prividnog otpora uslijed priključka linije na telefonsku centralu.

Prva njemačka metoda za izradu umjetnih linija, koja potječe od Küpfmüller-a, uzima nasuprot za osnovicu Pupinovu liniju čija



Slika 72

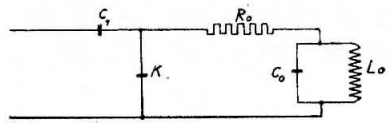
je duljina početnog polja 0,815 s. Stvarno dana duljina početnog polja $\frac{s}{2}$ dopunjuje se pomoću paralelno vezanog kondenzatora $K = 0{,}315\ C$ na 0,815 s (sl. 74.) U tom se slučaju reproducira realna komponenta prividnog otpora pomoću otpora $R_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ a kapacitativna komponenta poništava se umetanjem jednog oscilatornog kruga na početku linije koji se sastoji iz samoindukcije $L_0 = 0{,}339\ L$ i kapaciteta $C_0 = 0{,}382\ C$.

Amerikanska tehnika pretpostavlja da se umjetne linije prema Hoyt-u izrade na osnovu mjerenja prividnog otpora Pupinovog ka-



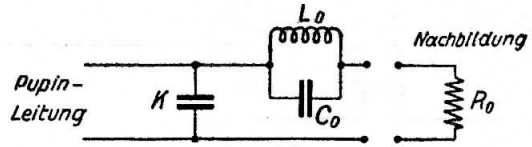
bela u samoj fabrici a samo da se najpovoljnija vrijednost kapaciteta za paralelno vezani kondenzator $K$ odredi na licu mjesta.

Svi izračunani otpori i kondenzatori korigiraju se empirijski, u koju svrhu služi aparat za mjerenja gušenja odjeka ili, kako se on drukčije zove, aparat za mjerenje nesimetrije. Ovaj aparat je amplifikator sa jednom cijevi prema sl. 69 (samo sa više cijevi u kaskadi, da se potigne dovoljno pojačanje nezavisno od frekvencija



Slika 73

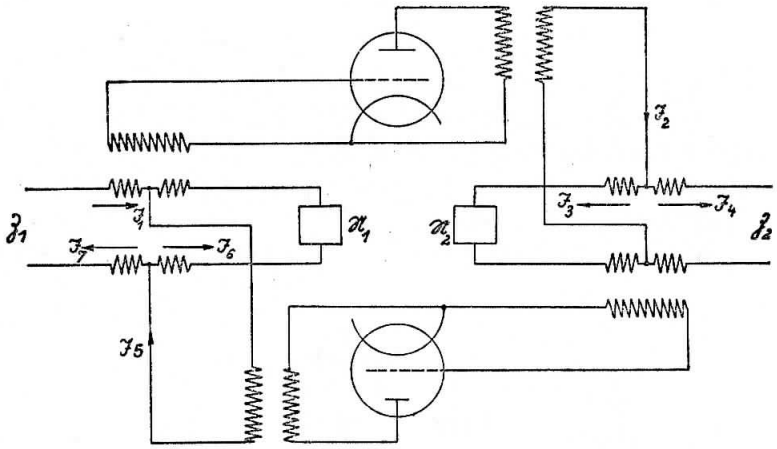
za onu oblast frekvencija koje nas interesiraju). Aparat se spaja između telefonske linije i umjetne linije koju se želi za nju izvesti. Za otpore i kondenzatore umjetne linije uzimaju se najprije minimalne vrijednosti koje prema iskustvu odgovaraju danom tipu linije, a za event. ovojnice, uzima se odgovarajuća srednja vrijednost samoindukcije. Pojačanje amplifikatora sa jednom cijevi može se



Slika 74

regulirati po stupnjevima; najprije se udesi onaj stupanj kod koga amplifikator počinje zviždit. Potom se poboljšava umjetna linija dodavanjem dopunskih kapaciteta odn. otpora, dok zviždanje ne iščezne. Kad se uzme viši stupanj pojačanja, zviždanje će opet početi. Izvršiti ćemo dalje usavršenje umjetne linije, da se zviždanje ukloni, zatim ćemo ići dalje sa pojačanjem i t. d., i t. d. Napokon ćemo doći do jedne granice pojačanja, na kojoj se zviždanje ne može otkloniti ni najbrižljivijim ugađanjem elementa umjetne linije pomoću kapaciteta i otpora koje imamo na raspoloženju. Ovo granično pojačanje jednako je gušenju odjeka koji nastaje na mjestu spajanja telefonske linije i njene umjetne linije, jer smo struju povratne sprege baš toliko pojačali, da jedno izazvano titranje može samo sebe održati.

Isti postupak se primijenjuje kod određivanja umjetne linije i za drugu telefonsku liniju koja je vezana na amplifikator. Umjetne linije su dobre ako je srednja aritmetička vrijednost obiju nađenih gušenja odjeka veća za najmanje 0,4 Nepera od efektivnog pojačanja dotičnog amplifikatora. U ovome slučaju zamjenjuju se nađeni elementi umjetne linije fiksnim otporima i kondenzatorima a da se ne mora vršiti dugotrajno snimanje krivulje prividnog otpora telefonskih linija u ovisnosti o frekvenciji. Ako, naprotiv, previše malo gušenje pokaže da se za danu telefonsku liniju ne može, izraditi dovoljno dobra umjetna linija, uslijed jakih promjena na krivulji



Slika 75

prividnog otpora, onda se ova krivulja mora snimiti, da se odredi smetnja.

Ista ova metoda mjerenja gušenja odjeka upotrebljava se da se s vremena na vrijeme ustanovi da li se nije u toku rada izmijenila jednakost između telefonske linije i njene umjetne linije. Promjene mogu nastati uslijed prekida žice, dodira loših nastavaka i loše izolacije i napokon uslijed nejednakog padanja samoindukcije Pupinovih ovojnica, zbog čega se kvari longitudinalna simetrija uzastopnih polja, te nastaju znatna kolebanja krivulje prividnog otpora u ovisnosti o frekvenciji. I ova je opasnost bila uzrok da su izbačene iz upotrebe ovojnice sa jezgrom od žice na onim kablovskim trasama koje su izložene induktivnim djelovanjima vodova jake struje (odjeljak 3 i 6).



Na slijedeći pojednostavnjeni način pokazati ćemo kakvo se pojačanje može postići kad postoji jedna pogriješka u izjednačenosti određene veličine a da amplifikator ne zviždi. Polazeći od slike 75 metnuti ćemo:

$\mathfrak{J}_2$ (pojačana struja) $= \mathfrak{k} \cdot \mathfrak{J}_1$ (dolazna struja)

$= (k + ja)\, \mathfrak{J}_1 = \mathfrak{J}_3 + \mathfrak{J}_4$ (razgranjenje preko $\mathfrak{N}_2$ i $\mathfrak{Z}_2$) (164)

ovdje $k$ znači pojačanje a $a$ pomak faze pojačane struje.

Linearno pojačanje amplifikatora jednako je odnosu veličina (modula) struje koja odlazi $\mathfrak{J}_4$ i struje koja dolazi $\mathfrak{J}_1$:

$$\frac{I_4}{I_1} = e^s \tag{165}$$

Ako je $\mathfrak{N}_2 = \mathfrak{Z}_2$ onda bi bilo $I_4 = \frac{I_2}{2} = \frac{kI_1}{2}$ (jedn. 164) (166)

$$\frac{I_4}{I_1} = \frac{k}{2} = e^s$$

U općem slučaju je:

$\mathfrak{J}_3 \cdot \mathfrak{N}_2 = \mathfrak{J}_4 \cdot \mathfrak{Z}_2 = (\mathfrak{J}_2 - \mathfrak{J}_3) \cdot \mathfrak{Z}_2$ (jedn. 164)

$\mathfrak{J}_3 (\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2) = \mathfrak{J}_2 \cdot \mathfrak{Z}_2$

$$\mathfrak{J}_3 = \mathfrak{J}_2 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} = \mathfrak{k}\mathfrak{J}_1 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}} \quad \text{(jedn. 164)} \tag{167}$$

$\mathfrak{J}_4 \cdot \mathfrak{Z}_2 = (\mathfrak{J}_2 - \mathfrak{J}_4)\, \mathfrak{N}_2$

$\mathfrak{J}_4 (\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2) = \mathfrak{J}_2 \cdot \mathfrak{N}_2$

$$\mathfrak{J}_4 = \mathfrak{J}_2 \cdot \frac{\mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} = \mathfrak{k}\mathfrak{J}_1 \cdot \frac{\mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} \quad \text{(jedn. 164)} \tag{168}$$

$\mathfrak{J}_3$ i $\mathfrak{J}_4$ protječu samo kroz polovinu primarnog namotaja desnog diferencijalnog translatora; za razliku struja ($\mathfrak{J}_3$—$\mathfrak{J}_4$), ako ne postoji potpuna jednakost između $\mathfrak{N}_2$ i $\mathfrak{Z}_2$, imati će ovaj translator za polovicu manji prenos nego za govornu struju koja dolazi telefonskom linijom s desne strane. To znači da će na amplifikator u suprotnom pravcu djelovati samo polovina razlike struja

$$\frac{\mathfrak{J}_3 - \mathfrak{J}_4}{2} = \frac{\mathfrak{k}}{2} \cdot \mathfrak{J}_1 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} \text{ (једн. 167 и 168).} \tag{169}$$

Uz pretpostavku, koja je praktično dovoljna točna, da amplifikator u obadva pravca podjednako pojačava, biti će:

$$\mathfrak{J}_5 = \mathfrak{k} \cdot \frac{(\mathfrak{J}_3 - \mathfrak{J}_4}{2} \text{ (по jedn. 164)} = \frac{\mathfrak{k}^2}{2} \cdot \mathfrak{J}_1 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} \text{ (jedn. 169)}$$

$$\mathfrak{J}_5 = \mathfrak{J}_6 + \mathfrak{J}_7 \text{ (рачвање на } \mathfrak{N}_1 \text{ и } \mathfrak{Z}_1) \tag{170}$$

Prema jedn. 167 biti će:

$$\mathfrak{J}_6 = \mathfrak{J}_5 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1} = \frac{\mathfrak{k}^2}{2} \cdot \mathfrak{J}_1 \cdot \frac{\mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1} \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} \text{ (jedn. 170)} \qquad (171)$$

a prema jedn. 168 biti će:

$$\mathfrak{J}_7 = \mathfrak{J}_5 \cdot \frac{\mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1} = \frac{\mathfrak{k}^2}{2} \cdot \mathfrak{J}_1 \cdot \frac{\mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1} \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} \text{ (jedn. 170)} \qquad (172)$$

Ako postoji nejednakost između $\mathfrak{N}_1$ i $\mathfrak{Z}_1$, onda će, prema gore izloženome, djelovati na amplifikator u prvobitnom govornom pravcu polovina struje povratne sprege

$$\frac{\mathfrak{J}_6 - \mathfrak{J}_7}{2} = \frac{\mathfrak{k}^2}{2} \cdot \mathfrak{J}_1 \cdot \frac{\mathfrak{Z}_1 - \mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1} \cdot \frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2} \text{ (jedn. 170 i 171)} \qquad (173)$$

Amplifikator počinje zviždati čim je vrijednost (modul) razlike $\left|\frac{\mathfrak{J}_6 - \mathfrak{J}_7}{2}\right| > I$, kod čega se šutnjom pretpostavlja, da povratna struja stoji u fazi prema dolaznoj govornoj struji tako, da se obadvije pomažu. Dakle granični je uslov:

$$\frac{k^2}{4} \cdot I_1 \left|\frac{\mathfrak{Z}_1 - \mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1}\right| \cdot \left|\frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2}\right| \text{ (moduli razlomaka)} =$$

$$= e^{2s} \cdot I_1 \left|\frac{\mathfrak{Z}_1 - \mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1}\right| \cdot \left|\frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2}\right| \leqq I_1, \text{ (jedn. 166)}$$

$$e^{2s} \left|\frac{\mathfrak{Z}_1 - \mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1}\right| \cdot \left|\frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2}\right| \leqq 1. \qquad (174)$$

Ako metnemo da je

$$2\left|\frac{\mathfrak{Z}_1 - \mathfrak{N}_1}{\mathfrak{Z}_1 + \mathfrak{N}_1}\right| \cdot \left| = \delta_1, \qquad 2\left|\frac{\mathfrak{Z}_2 - \mathfrak{N}_2}{\mathfrak{Z}_2 + \mathfrak{N}_2}\right| = \delta_2, \qquad (175)$$

biti će:

$$e^{2s} \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \leqq 4,$$

$$e^s \leqq \frac{2}{\sqrt{\delta_1 \cdot \delta_2}},$$

$$s \leqq \ln \frac{2}{\sqrt{\delta_1 \cdot \delta_2}}. \qquad (176)$$

Slika 76 predstavlja ovisnost granice zviždanja izražene pojačanjem s od produkta $(\delta_1 \cdot \delta_2)$. relativne nejednakosti prividnih otpora. Ako imamo na pr. kod dvije telefonske linije, koje su priključene na amplifikator, razilaženje krivulja prividnog otpora za ± 5% od odnosnih srednjih krivulja, koje se moraju točno slagati



sa kretanjem prividnog otpora odgovarajućih umjetnih linija, onda će biti u najnepovoljnijem slučaju:

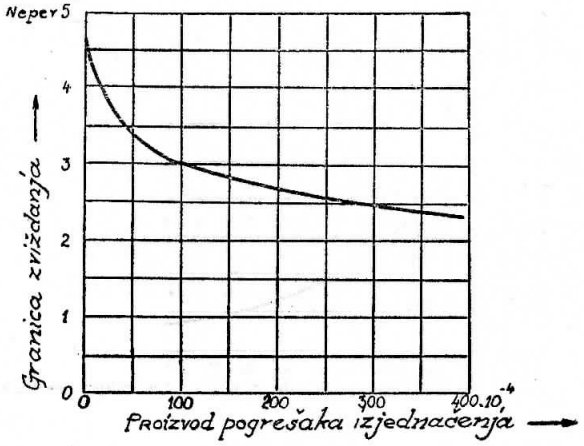
$$\delta_1 = \delta_2 = 2\left|\frac{Z - N}{Z + N}\right| = 2\left|\frac{0{,}95 - 1{,}0}{0{,}95 + 1{,}0}\right| = \left|-0{,}0513\right|,$$

i

$$s \leqq \ln \frac{2}{0{,}0513} \sim \ln 39,$$

$$s \lessapprox 3{,}7 \text{ Nepera.}$$

Amerikanci ispituju jednakost između linije i njene umjetne linije na slijedeći način: C jedne strane amplifikatora stavi se

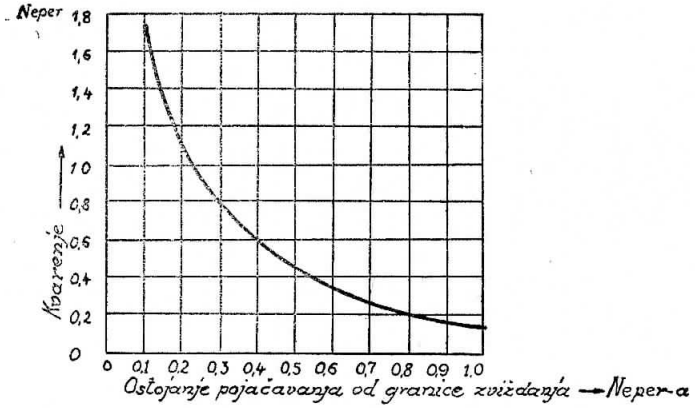



Slika 76

kratki spoj na linijske spojnice, a na spojnice gdje se spaja umjetna linija ne spaja se ništa (ili obrnuto); s druge strane amplifikatora spojnice su vezane sa linijom i njenom umjetnom linijom koja se kontrolira. Zatim se povećava pojačanje sve dotle dok ne počne zviždanje. Ukupno pojačanje u krugu povratne sprege (jednako dvostrukom pojačavanju svake polovine amplifikatora), koje je za to potrebno, naziva se »točka zviždanja«. Ova je vrijednost očevidno identična sa gore opisanim gušenjem odjeka.

Za sve frekvencije, za koje ne postoji jednakost između linije i umjetne linije, javlja se povratna sprega. Slično onome što je rečeno u odjeljku 2 biti će povećano ili smanjeno pojačanje odnosnih djelomičnih titranja, što ovisi o odnosu faza struje uslijed povratne sprege i dolazne struje. Pojačanje dakle, nema onaj jednomjerni

tok u ovisnosti o frekvenciji kao na pr. krivulja u sl. 64 obilježena sa »gušenje kabl. polja«, već se mijenja nepravilno oscilirajući oko ove normalne krivulje, sasvim slično nepravilnim promjenama prividnog otpora u ovisnosti o frekvenciji kako je to predstavljeno u sl. 7. Distorzije uslijed povratne sprege djeluju tek onda praktično osjetno, kad se maksimalni vrhovi stvarne krivulje pojačanja za odnosne frekvencije približe gore spomenutoj granici zviždanja. Jasno je da će se realno pojačanje $s_v$ to jače razlikovati od nominalnog pojačanja s što je pojačanje za dopunsku frekvenciju bliže granici zviždanja $s_0$. Dr. Feldtkeller (Siemens i Halske) obradio je računski ove odnose i formulirao ih na slijedeći način: uslijed povratne sprege (reakcije) krivulja realnog pojačanja ima najveći




Slika 77

mogući razmak od krivulje nominalnog pojačanja s prema dolje $\Delta s_1 = \ln \frac{1}{1 + e^{-2(s_0 - s)}}$ a prema gore $\Delta s_2 = \ln \frac{1}{1 - e^{-2(s_0 - s)}}$. Slika 77 pokazuje (veće) moguće razmake $\Delta s_2$ prema gore u ovisnosti o razmaku između nominalnog pojačanja s i granice zviždanja $s_0$. Ako distorzija uslijed povratne sprege ni za ma koju frekvenciju ne treba da predje na pr. $\Delta s_2 = 0{,}6$ Nepera, onda nominalno pojačanje mora ostati stalno ispod granice zviždanja za $(s_0 - s) \geqq 0{,}4$ Nepera. Ako se krivulja prividnog otpora udaljuje od nominalne krivulje za ± 5% onda je dopušteno nominalno pojačanje $s = 3{,}7 - 0{,}4 = 3{,}3$ Nepera za djelomična titranja najviše pojačana za koja baš mogu postojati spomenute maksimalne razlike prividnog otpora.

Oscilatorne promjene krivulja prividnog otpora rastu, kao što pokazuju sl. 7 i 8, što se dolazi bliže graničnoj frekvenciji Pupi-



nove linije (uslijed čega se za fantomne linije kod DM-kablova, zbog njihove veće granične frekvencije, mogu lakše izraditi umjetne linije). Granica zviždanja pada kad frekvencije rastu, dok nominalno pojačanje kod antidistorzionih amplifikatora istovremeno raste. Obadvije krivulje se, dakle, iz dvostrukog razloga, približuju jedna drugoj, u koliko frekvencija raste, a ujedno raste i distorzija uslijed povratne sprege. Iz ovoga razloga amerikanska tehnika, kao što je već spomenuto u odjeljku 8, radi amplifikatore za dvožičnu telefoniju koji vrše pojačanje skoro neovisno o frekvenciji da se na taj način sigurno izbjegne opasnost od distorzije povratne sprege. Po našem mišljenju to je pretjerano.

Izrada umjetnih linija znatno se olakšava, ako se ograničimo na pojačanje najvažnijih frekvencija za prenos govora (do 2000 Herca) a više frekvencije prigušimo pomoću filtera čija je granična frekvencija $f_0 = 2400$ Herca (odjeljak 2) a koji se umeću ispred ulaznog translatora ($Sp_1$ i $Sp_2$ u sl. 66). Preneseni govor i kraj prigušenja širokog pojasa frekvencija bolji je nego govor iskrivljen povratnom spregom djelomičnih titranja viših frekvencija. Dovoljni su u opće felteri sa dva člana. Korisno je da se uz ovojnicu prvoga člana, vezanu u red sa linijom, spoji paralelno pogodan kondenzator, da se tako dobije jedan krug rezonacije čija je vlastita frekvencija otprilike jednaka graničnoj frekvenciji telefonske linije. U tom slučaju ovaj član zadržava naročito opasna titranja u blizini granične frekvencije.

Ako najveće nominalno pojačanje za 2000 Herca iznosi $s = 3{,}3$ Nepera, onda će pojačanje za 800 Herca iznositi, ako je antidistorzija normalna, $s \pm 3{,}0$ Nepera.

Ako se na pupinizirani kabel uključi jedan jedini amplifikator za dvožičnu telefoniju, onda bi se lako moglo postići nominalno pojačanje od $s = 3{,}0$ Nepera za 800 Herca, naravno ako se upotrijebi amplifikator sa više cijevi, pošto se sa jednom cijevi, kao što je ranije izračunato, može postići pojačanje za svaki govorni pravac svega $s = 1{,}9$ Nepera. Prilike će biti najpovoljnije ako se uključi više amplifikatora jedan za drugim. Ne mogu se potpuno izbjeći oscilacije krivulje prividnog otpora pa prema tome ni slabe struje povratne sprege onih frekvencija koje odgovaraju maksimalnim vrijednostima krivulje. Ove struje, koje djelomično odlaze natrag na liniju, zbrajaju se ili oduzimaju sa govornim strujama koje idu u suprotnom pravcu. Djelovanje je isto, kao kad bi amplifikator imao prividni otpor koji se mijenja sa frekvencijom. Ove se promjene dodaju električnim nepravilnostima prediućeg amplifika-

torskog polja, prividno povećavajući ih. U koliko je veći broj amplifikatora vezanih u red ova teškoća raste i zbog nje se mora smanjiti pojačanje pojedinih amplifikatora.

U odjeljku 2 vidjeli smo da oscilacije krivulje prividnog otpora, izazvane refleksijama koje nastaju u jednoj točki padaju u koliko raste udaljenost te točke od mjesta mjerenja, u ovome slučaju od mjesta gdje je amplifikator, i to u razmjeru $e^{-2b}$ ako gušenje od točke refleksije do mjesta mjerenja iznosi $b$. Slično vrijedi i u pogledu djelovanja nejednakosti prividnog otpora u udaljenim točkama amplifikacije na jedan određeni amplifikator za dvožičnu telefoniju. U ovom slučaju uzima se u račun razlika između ukupnog gušenja $\Sigma b$ amplifikatorskih polja i ukupnog pojačanja ukopčanih amplifikatora $\Sigma s$. Za neke frekvencije ovako reducirane pogriješke uslijed nejednakosti na udaljenim točkama amplifikacije zbrajaju se sa nejednakostima prividnog otpora u promatranom amplifikatoru i snižavaju njegovu granicu zviždanja (prema sl. 76).

Netočno ugađanje prividnih otpora amplifikatora kao cjeline, zajedno sa završnim translatorom, sa prividnim otporima telefonskih linija djeluje u istom smislu, proizvodeći refleksije na mjestima spajanja i nove promjene krivulja prividnog otpora amplifikatorskih polja. S toga nije dovoljno da se amplifikator prilagodi telefonskoj liniji samo za srednju govornu frekvenciju, već promjene kod obiju krivulja prividnog otpora moraju međusobno biti jednake za cio pojas frekvencija koje se prenose. S ovoga razloga vrlo je važno, da se svako amplifikatorsko polje počne i završi sa polovinom razmaka ovojnica, da se dobiju jednolike promjene prividnog otpora za jednake linije na mjestima amplifikacije, na koje bi se mogli prilagoditi prividni otpori amplfikatora. Važno je prije svega, da se kod amplifikatora reproducira u umjetnoj liniji kapacitivna komponenta prividnog otpora pupinizirane linije za niske frekvencije (vidjeti sl. 6). Ovo se postiže na ulazu u amplifikator pomoću prikladnog dimenzioniranja malo prije spomenutog filtera, a na izlazu umetanjem kondenzatora $K'$ između izlaznog i diferencijalnog translatora (sl. 66).

Svi dopunski elementi za antidistorziju amplituda, reguliranje pojačanja, filteri i elementi za ugađanje prividnih otpora uključuju se ispred amplifikatorskih cijevi, u koliko je to moguće, da ove ne bi pojačavale energiju koja se ne iskorišćuje.

Jasno je da će granica zviždanja onih amplifikatora, kod kojih se sa obadvije strane nalaze kablovi na čijim se krajevima opet nalaze drugi amplifikatori, biti jače snižena nego kod prvog i posljednjeg amplifikatora duple telefonske linije. Uzmimo na pr. jednu duplu telefonsku liniju sa tri amplifikatora umetnuta na jednakim razmacima čije se pojačanje točno izjednačuje sa gušenjem linije u amplifikatorskom polju. Neka u svakoj točki amplifikacije postoji ista nejednakost prividnih otpora $\delta$. Promatrati ćemo najprije prvi amplifikator uključen s lijeve strane. Nejednakostima na njegovoj desnoj strani dodaju se za neke frekvencije reducirane nejednakosti slijedeća dva amplifikatora. Pošto je pak njihovo pojačanje jednako gušenju predidućeg amplifikatorskog polja, to je redukcioni faktor $e^0 = 1$, t. j. nejednakosti slijedećih amplifikatora djeluju u punoj mjeri na desnu stranu prvog amplifikatora. Proizvod relativne nejednakosti prividnih otpora na objema stranama prvog amplifikatora biti će $\delta \cdot 3\,\delta = 3\,\delta^2$. Granica zviždanja pasti će prema jedn. 175 za $\ln \sqrt{3} \approx 0{,}55$ Nepera. Slično se dobiva i za treći (posljednji) amplifikator.

Nejednakost na svakoj strani srednjeg amplifikatora podvostručuje se zbog okolnih amplifikatora. Proizvod nejednakosti biti će $2\,\delta \cdot 2\,\delta = 4\,\delta^2$. Granica zviždanja pada u tom slučaju za $\ln \sqrt{4} \approx 0{,}69$ Nepera.

Tablica V. daje pregled sniženja granice zviždanja pojedinih amplifikatora na duplim telefonskim linijama sa 1 do 5 amplifikatora uključenih na međusobno jednakim razmacima a za slučaj kad je pojačanje jednako gušenju između amplifikatorskih polja.

Tablica V

| Broj amplifikatora | 1. Amplifikator Nepera | 2. Amplifikator Nepera | 3. Amplifikator Nepera | 4. Amplifikator Nepera | 5. Amplifikator Nepera |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | | | | |
| 2 | 0,34 | 0,34 | | | |
| 3 | 0,55 | 0,69 | 0,55 | | |
| 4 | 0,69 | 0,90 | 0,90 | 0,69 | |
| 5 | 0,80 | 1,04 | 1,10 | 1,04 | 0,80 |

Iako, s obzirom na djelovanje povratne sprege, nema nikakve bojazni, ako se kod kabliranih linija uključi u red do 10 amplifikatora za dvožičnu telefoniju, ipak se u praksi ne ide preko 5 ako nije primijenjena antidistorzija faza za duple linije, o kojoj će se detaljnije govoriti u odjeljku 10. U tom će slučaju iznositi granica zviždа-

nja, ako se krivulja prividnog otpora razilazi za ± 5% od nominalne vrijednosti, i to za srednji (treći) amplifikator $s_{03} = 3{,}7 - 1{,}1 = 2{,}6$ Nepera, za drugi i četvrti $s_{02,4} = 3{,}7 - 1{,}04 = 2{,}66$ Nepera i za obadva vanjska 3,7 — 0,8 = 2,9 Nepera. Ako se uzme da je nominalno pojačanje svakog amplifikatora $s = 1{,}95$ Nepera za najveću frekvenciju od 2000 Herca koja se ima pojačati, onda će iznositi razmak od granice zviždanja za treći amplifikator $s_{03} - s = 2{,}6 - 1{,}95 = 0.65$ Nepera, za drugi i četvrti $s_{02,4} = 2{,}66 - 1{,}95 = 0{,}71$ Nepera i za dva spoljna $s_{01,5} = 2{,}9 - 1{,}9 = 0{,}95$ Nepera. Prema slici 73 biti će moguća maksimalna distorzija za treći amplifikator $\Delta s_3 = 0{,}32$ Nepera, za drugi i četvrti $\Delta s_{2,4} = 0{,}27$ Nepera i za obadva vanjska $\Delta s_{1,5} = 0{,}15$ Nepera, dakle u najnepovoljnijem slučaju $\Sigma\Delta s = 0{,}32 + 2 \cdot 0{,}27 + 2 \cdot 0{,}15 = 1{,}16$ Nepera. Nominalno pojačanje iznosi za 800 Herca nešto iznad 1,4 Nepera, a gušenje amplifikatorskog polja može iznositi $b_0 = 1{,}4$ Nepera, da se dobije propisani ekvivalent prenosa $b_r = 1{,}3$ Nepera.

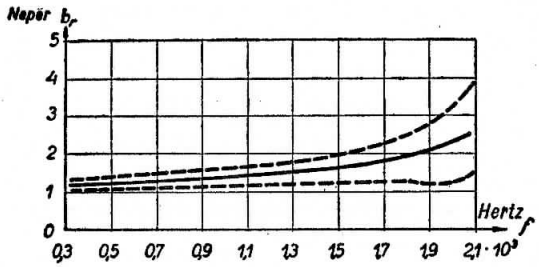
Srednja duljina amplifikatorskog polja kod pupiniziranih kablova sa žilama promjera 0,9 mm iznosi po tablicama II i III 70 km, a kod žila sa promjerom 1,4 mm 140 km. Promjeri žila od 0,9 i 1,4 mm smatraju se u njemačkoj tehnici kao najekonomičniji, kad se uzmu u obzir troškovi građenja i održavanja međugradskih kablova zajedno sa Pupinovim ovojnicama i amplifiktorskim stanicama. Amerikanska tehnika je usvojila skoro iste promjere žila i to 0,9 i 1,3 mm. Odnos promjera žila namjerno je tako izabran, da konstanta gušenja za krug sa tanjom žicom (oko 0,02 Nepera/km) bude dva puta veća nego konstanta kruga sa debljom žilom (oko 0,01 Nepera/km). Ove vrijednosti vrijede približno za sva tri sistema pupiniziranja DM-kablova spomenuta u odjeljku 5. Sporedne amplifikatorske stanice, u kojima se nalaze samo amplifikatori za dvožičnu telefoniju za linije od 0,9 mm (ako se takve u opće upotrebljuju, vidjeti odjeljak 10), postavljaju se točno u sredini glavnog amplifikatorskog polja, između dvije glavne amplifikatorske stanice, u kojima se nalaze amplifikatori za sve dvožične strujne krugove normalnog međugradskog kabela. — Naravno da se gore navedene duljine amplifikatorskih polja mogu nešto mijenjati, da se dobije pogodnije mjesto za smještanje amplifikatorske stanice.

Danas se radi sa amplifikatorima za dvožičnu telefoniju na duljinama čije gušenje iznosi do $6 \cdot 1{,}4 = 8{,}4$ Nepera, što odgovara duljini od 840 km za kablove sa žilama promjera 1,4 mm. Ekvivalent prenosa (ili preostalo gušenje) iznosi za 800 Herca $b_r = 1{,}3$ Nepera, t. j. nalazi se u dopuštenoj granici.



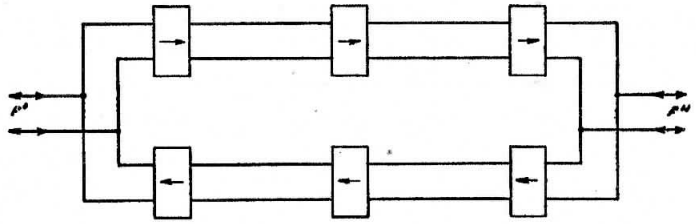
Stvarni ekvivalent mijenja se nepravilno u ovisnosti o frekvenciji uslijed distorzija izazvanih povratnom spregom. Ove promjene vrše se oko idealne krivulje između izvjesne gornje i donje granice, koje su za određene prilike predočene isprekidanim linijama u sl. 78.

Ako međugradske telefonistice između sebe govore na međugradskoj liniji, onda je napon govorne struje prigušen na ulazima




Slika 78

u amplifikatore za $b = 1{,}4$ Nepera. Ako pak razgovaraju pretplatnici, onda, prema udaljenosti pretplatnika od međugradske centrale dodaje se još jedno gušenje od najviše 1 Nepera. Uzmimo da se na

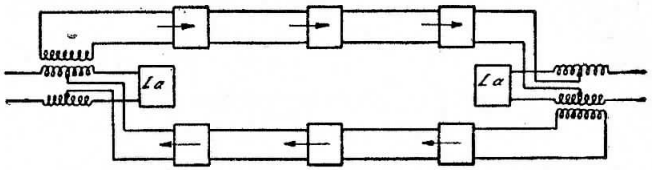


Slika 79

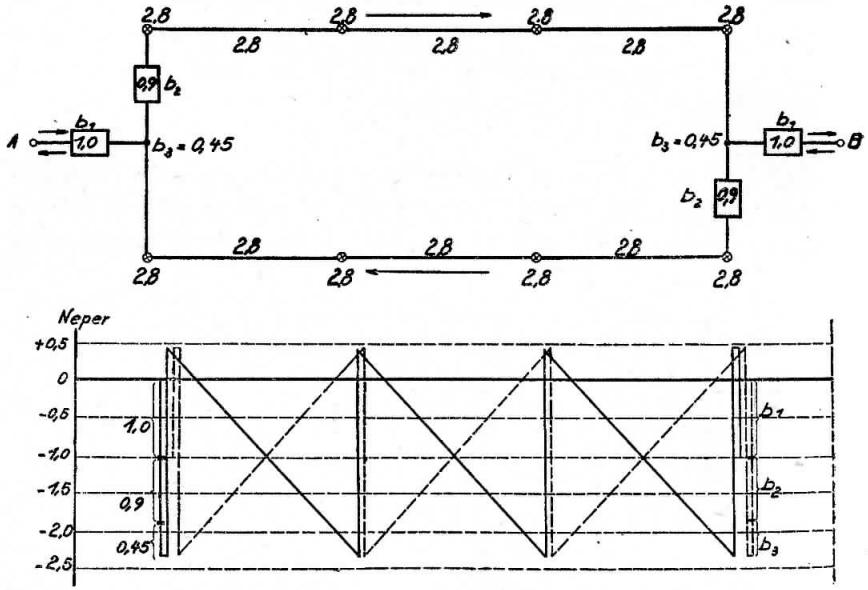
međugradsku liniju šalje efektivni napon od 2 Volta, taj će napon do ulaza u amplifikator pasti na $2 \cdot e^{-1{,}3} \approx 0{,}52$ Volta. Na ulazni traslator dolazi, prema onome što je prije rečeno $0{,}25 \cdot e^{-0{,}45} \approx 0{,}33$ Volta. Prenos kod ulaznih translatora amplifikatora za dvožičnu telefoniju izvedbe Siemens i Halske okruglo je 1 : 15, te će se dobiti efektivni napon na rešetki $0{,}33 \cdot 15 \approx 5$ V, što odgovara maksimalnoj vrijednosti od $5\sqrt{2} \approx 7$ Volta, t. j. dopuštena vrijednost za pojačanje bez distorzije.

Za daljine preko 840 km uzima se za svaki govorni pravac posebna dupla linija sa amplifikatorima koji djeluju samo u jednom

pravcu (sl. 79). Ovu ideju dao je Holandanin van Kesteren. Povratna sprega nastaje tek onda, kad ukupno pojačanje kruga povratne sprege, koji se sastoji iz obadvije pojedinačne linije vezane u red, prijeđe ukupno gušenje ovoga kruga, t. j. u svakoj polovini kruga može se dati toliko pojačanje, da gušenje četverožičnog kruga bude



Slika 80




Slika 81

skoro poništeno. Nijemac Ohnesorge i nezavisno od njega Amerikanac Campbell dali su još bolje riješenje spajajuće duple linije (pretplatničke ili dalje međugradske) sa četverožičnim krugom preko diferencijalnog translatora ili mosta dodajući za te linije njima odgovarajuće umjetne linije (sl. 80). Cijeli četverožični krug djeluje u tom slučaju kao jedan jedini amplifikator za dvožičnu telefoniju razvučen na stotine i hiljade kilometara. Na ovaj način može se dobiti jedno dopunsko pojačanje ograničeno valjanošću umjetnih



linija kod oba mosta. Kao kod amplifikatora za dvožičnu telefoniju tako se i ovdje kod svakog mosta umeće filtar za nisku frekvenciju da se priguše više govorne frekvencije za koje je teže izvesti umjetne linije.

Kao što smo vidjeli u odjeljku 8, pojačanje, postignuto u jednom stupnju, kod svakog amplifikatora za četverožičnu telefoniju koji je antidistorziran, pa prema tome i srednje dopušteno gušenje u amplifikatorskom polju, iznosi $s = b_0 = 2{,}8$ Nepera za srednje govorne frekvencije. Dakle, četverožične linije za svaki amplifikatorski krug mogu imati dva puta veće gušenje nego dvožične linije. U sl. 81 šematički je predočena jedna potpuna četverožična veza sa priključenim dvožičnim linijama (kratke pretplatničke linije). Kratke pretplatničke linije u cilju olakšanja izvedbe njihovih umjetnih linija produžuju se umjetno pomoću gušenja $b = 1$ Neper.

Brojevi u slici 81 koji stoje uz amplifikatore označuju njihovo pojačanje, a brojevi duž kabela i kraj umjetnih gušenja pokazuju njihovo gušenje. Amplifikatori za četverožičnu telefoniju u idealnom primjeru potpuno ukidaju gušenje prediućeg amplifikatorskog polja ($s = b_0 = 2{,}8$ Nepera). Pred svakim amplifikatorom, koji se nalazi na početku odn. kraju četverožičnih kruga, umeće se u polazni govorni pravac izvjesno umjetno gušenje (u našem primjeru $b_2 = 0{,}9$ Nepera) da se, s obzirom na gubitke u mostu (diferencijalnom translatoru), koji predstavljaju prirast gušenja za $b_3 \approx 0{,}45$ Nepera, postigne da govorne struje dođu na kraj linije sa ekvivalentom prenosa $b_r = 1{,}4$ Nepera.

U »dijagramu nivoa prenosa« (sl. 81 dolje) debelo izvučena linija predstavlja gušenje struja odn. napona u govornom pravcu *A—B* u odnosu prema međugradskoj centrali *A* kao polaznoj a isprekidana linija predstavlja gušenje u govornom pravcu *B—A* u odnosu prema centrali *B*. Ako pratimo debelo izvučenu liniju od centrale *A* vidjeti ćemo, da nivo struje odn. napona pada uslijed umjetnog gušenja u pretplatničkoj liniji za $b_1 = 1{,}0$ Nepera, u lijevom mostu nivo će dalje pasti za $b_2 + b_3 = 1{,}35$ Nepera, dakle za ukupno — 2,35 Nepera. U prvom amplifikatorskom polju nivo će postepeno padati za $b = 2{,}8$ Nepera i doći opet na nivo — 2,35 Nepera, ponovno penjanje u drugom amplifikatoru za $s = 2{,}8$ Nepera na nivo + 0,45 Nepera i t. d. i t. d. Nivo na ulazima u amplifikatore iznosi — 2,35 Nepera, i prema gušenju pretplatničke linije do međugradske centrale može pasti za još jedan Neper. Ako se u međugradsku liniju šalje efektivni napon od 2 Volta, onda će efektivni

napon ispred prvog amplifikatora iznositi svega $2 \cdot e^{-2,35} = 0,19$ Volta. Pošto je prenos ulaznog transformatora kod amplifikatora za četverožičnu telefoniju tipa Siemens i Halske okruglo 1 : 20 to je osigurano neiskrivljeno pojačanje dolazećih govornih struja i u četverožičnoj telefoniji.

I bez obzira na praktični razlog, da se amplifikatorske stanice za četverožičnu telefoniju postave zajedno sa amplifikatorskim stanicama za dvožičnu telefoniju, kao i na bojazan od kompliciranosti amplifikatora ako se upotrijebe dva stupnja pojačanja, ne smije se pojačanje amplifikatora za četverožičnu telefoniju previše visoko uzimati s obzirom na preslušavanje u susjednim linijama u kabelu. Umetanjem amplifikatora povećava se mogućnost preslušavanja. Razmotriti ćemo najprije prilike u dvožičnoj telefoniji. Na početku i iza svakog umetnutog amplifikatora u krugu I koji izaziva smetnju postoji napon $E_a$ (svaki amplifikator potpuno uništava gušenje prediduće g amplifikatorskog polja, sl. 82). U prvom amplifikatorskom polju linije II, na koju se prenosi smetnja, inducira se sa prvog amplifikatorskog polja linije I napon $k_1 E_a$ tako isto na početku drugog amplifikatorskog polja napon $k_2 E_a$ Ovaj biva u povratnom pravcu pojačan i u prvom amplifikatorskom polju za istu vrijednost prigušen, djeluje dakle na početku linije sa istom jakošću

Faze pojedinih napona uslijed preslušavanja biti će naravno uslijed amplifikatora i amplifikatorskih polja pomaknute. Naponi uslijed preslušavanja, koji djeluju na liniju II, vektorski se slažu u ukupan napon koji izaziva smetnju. Za izvjestan broj djelomičnih titranja naponi preslušavanja, koji djeluju na početku linije imati će istu fazu. Za ove frekvencije, ako ima $n$ amplifikatora [$(n - 1)$ amplifikatorskih polja], iznositi će napon koji proizvodi smetnju na početku linije:

$$E_1 = (k_1 + k_2 + k_3 + \ldots + k_n + k_{n+1})\, E_a \cdot \approx (n + 1)\, kE_a, \qquad (177)$$

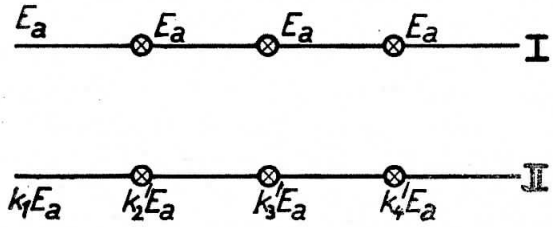
ako $k$ znači srednju vrijednost sprege amplifikatorskog polja. Za pojedine frekvencije $n$ amplifikatora vezanih u red povećavaju djelovanje preslušavanja na $(n + 1)$ puta veću vrijednost nego što iznosi smetnja koja se inducira u jednom amplifikatorskom polju. Gušenje preslušavanja za ova djelomična titranja pada za $\Delta b = \ln (n + 1)$. Na sreću, kod prenosa govora od utjecaja je srednje smanjivanje za sve frekvencije, a ono je, kao što praksa pokazuje, mnogo manje. Stvarno se može računati sa smanjenjem gušenja preslušavanja za $\Delta b = 0,3$ do $0,5$ Nepera.



Ako se sprege preslušavanja nalaze u samoj montaži amplifikatora, one će djelovati isto kao i kod amplifikatorskih polja. Da se izbjegne mogućnost ovakvog preslušavanja primarni namotaj diferencijalnog translatora dijeli se u četiri jednaka dijela koji se simetrično uključe u obadva voda (sl. 66).

Mora se naročita pažnja obratiti na to, da se potpuno otkloni preslušavanje kod četverožičnog kruga između duplih linija koje služe za prenos govora u suprotnim pravcima. Jer u ovom slučaju tek pojačana govorna energija u jednom pravcu djeluje na suprotni krug baš na onom mjestu, gdje su najslabije govorne struje koje se prenose.

Ne uzimajući u obzir preslušavanje, koje može biti između dvije susjedne linije priključene na četverožične telefonske linije,




Slika 82

vidimo iz slike 81 dolje, da je napon u govornom pravcu $A$—$B$ iza prvog lijevog amplifikatora veći za $e^{0,45}$ od napona $E_a$ koji se nalazi kod telefonskog aparata $A$. Napon preslušavanja ispred lijevog prvog amplifikatora jedne susjedne linije, koja služi za suprotni govorni pravac iste ili neke druge četverožične linije iznositi će $k_1 E_a \cdot e^{0,45}$ ko $k_1$ bude značilo spregu između dviju promatranih linija koncentriranu na lijevom kraju prvog amplifikatorskog polja. Napon preslušavanja pojačava se u prvom amplifikatoru unatrag za $e^{2,8}$ a priguši se u mostu za $e^{0,45}$ i u umjetnom gušenju pretplatničke linije za $e^{1,0}$ tako, da će napon preslušavanja, koji djeluje na aparat $A$, iznositi $k_1 E_a \cdot e^{0,45 + (2,8 - 0,45 - 1,5)} = k_1 E_a \cdot e^{0,45 + 1,35} = k_1 \cdot E_a \cdot e^{1,8}$

Na sličan način naći ćemo, da napon preslušavanja koji djeluje na aparat $A$, a koji nastaje uslijed sprege na početku drugog amplifikatorskog polja iznosi $k_2 \cdot E_a \cdot e^{0,45 + 2,8 - 28, + 1,35} = k_2 E_a \cdot e^{1,8}$. Za ona djelomična titranja, koja dolaze sa istom fazom u aparat $A$ na kraju četverožične linije koja je u smetnji, dobiti ćemo prema

jedn. 77, kad ima $n$ uključenih amplifikatora, kao napon koji izaziva smetnju u toj točki:

$$E_1 = (k_1 + k_2 + k_3 + \ldots + k_n + k_{n+1})\, E_a \cdot e^{1,8} \approx (n+1)\, kE_a \cdot e^{1,8}. \quad (178)$$

Kod četverožične linije djelovanje preslušavanja između suprotnih govornih pravaca ima $e^{1,8}$ puta veću vrijednost nego kod dvožičnih linija. S druge strane treba imati na umu, da ekvivalent prenosa kod četverožične linije, uzete za primjer, iznosi $b^r = 1.0$ Nepera, prema 1,4 Nepera kod dvožične linije. Glas koji dolazi na kraj linije manje je prigušen za $\Delta b = 0,4$ Nepera, a smetnja uslijed preslušavanja veća je nego kod dvožične linije za $e^{1,4}$ puta.

Preslušavanje između obadva govorna pravca, iste četvorke nije značajno, ako se ne pojavi smetnja uslijed odjeka (odjeljak 11), ali se mora paziti, da preslušavanje između različitih četverožičnih linija ne pređe dopuštene vrijednosti. Svi vodovi četverožičnih linija, koji služe za jedan govorni pravac, grupiraju se za sebe i gleda se, da se ta grupa u presjeku kabela odvoji prostorno što više od vodova drugog govornog pravca. Ovo se može postići na pr. na taj način, da se ove dvije vrste vodova grupiraju u dvjema polovinama istoga sloja u kabelu, a između njih, radi razdvajanja i zaštite, metnu dvožične linije; ili se vodovi za jedan govorni pravac stave u jedan sloj, a vodovi za drugi govorni pravac u drugi sloj, pošto između vodova u raznim slojevima postoji veliko gušenje preslušavanja suprotnog predenja slojeva. Na ovaj način uspjelo je u čistom Pupinovom kabelu postići vrijednosti preko $b = 11$ Nepera, tako da smanjenje gušenja preslušavanja uslijed umetanja amplifikatora ne predstavlja nikakvu opasnost i na najduljim četverožičnim linijama koje su u praksi izvedene. Ali se ipak pojačanje pojedinih četverožičnih amplifikatora ne smije previše visoko uzimati, pošto u istoj mjeri pada i gušenje preslušavanja. Ako se sa pojačanjem ne ide visoko iznad nultog nivoa, spriječiti će se sa sigurnošću i distorzija prenesenog govora uslijed preopterećenja cijevi. Da se održi propisani ekvivalent prenosa i onda kad je uključen u red veći broj amplifikatora za četverožičnu telefoniju, a da se po mogućnosti održi i malo prije opisani dijagram nivoa prenosa, potrebno je da se pojačanje svakog amplifikatora može fino regulirati. Propisano je da se pojačanje kod četverožičnih amplifikatgra može vršiti u stupnjevima od $\Delta s = 0,1$ Nepera, a za vrlo duge linije u stupnjevima od $\Delta s = 0.05$ Nepera. Kao što slika 63 pokazuje, reguliranje pojačanja vrši se pomoću potenciometra $S_1$ i $S_2$ ispred primarnog namotaja ulaznog translatora.



Smanjivanje gušenja ukrsnog preslušavanja između dvožičnih linija ili između četverožičnih linija istog govornog pravca manje je za $\Delta b = 1,4$ Nepera nego što je slučaj kod gušenja preslušavanja u dvožičnoj telefoniji; prema tome, susjednim krugovima ne prijeti nikakva opasnost s ove strane.

Ugađanje četverožičnog amplifikatora sa promjenama prividnog otpora priključenih kablovskih linija u ovisnosti o frekvenciji vrši se sa po jednim kondenzatorom u ulaznom krugu ($K'$) i u izlaznom krugu ($K''$) (slika 67).

Jedna naročita poteškoća javlja se kod dugih zračnih kablova na kojima se radi sa amplifiktorima. Ovo je samo, doduše, slučaj u amerikanskoj praksi. Kao što je poznato i otpor i kapacitet kabela mijenjaju se sa temperaturom, pa prema tome i gušenje. Temperaturni koeficijent bakra u vodovima iznosi 0,004. za svaki C°, a za izolaciju od papira i zraka 0,0006. Za površan račun upotrijebiti ćemo jedn.:

$$\beta = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}} \quad (178)$$

Ako se temperatura popne za $t^0$ onda će se konstanta gušenja povećati na:

$$\beta' = \frac{R(1+0,004t)}{2}\sqrt{\frac{C(1+0,0006t)}{L}} =$$

$$= \frac{R}{2}\,(1+0,004t)\cdot\sqrt{\frac{C}{L}}\cdot(1+0,0003t)$$

$$= \beta\,(1+0,0043t+0,0000012t^2) \approx \beta\,(1+0,0043t). \quad (179)$$

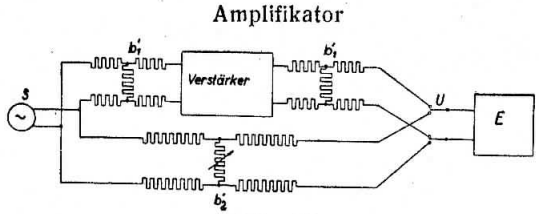
To znači da je temperaturni koeficijent gušenja okruglo 0,0043 za svaki C°.

U ljetne dane lako je moguća promjena temperature za 25° C koja se prenosi i na kabel. U tom slučaju, ako je kabel dug na pr. 1000 km, a žile od 0,9 mm imaju gušenje 20 Nepera, iznositi će promjena gušenja uslijed temperature $\Delta b = 2,15$ Nepera, drugim riječima govorna energija na ovakvom kabelu od jutra do podneva padne na osamdeseti dio. Jasno je da bi ovakvo nešto učinilo nemogućim uredan telefonski saobraćaj. S toga se na vrlo dugim zračnim kablovima moraju ugraditi automatski temperaturni regulatori. Tako na pr. prema jednoj konstrukciji Western Electric Co. kablovske linije čine jednu granu Weatstonovog mosta na svakom trećem

amplifikatoru. Struje izjedačenja koje teku kroz dijagonalu mosta mijenjaju se po pravcu i smislu sa temperaturom zračnog kabela. Ta struja pokreće relee, koji povećavaju ili smanjuju pojačanje.

Kod kablova položenih u zemlju, kao što je u Evropi skoro uvijek slučaj, prilike su mnogo povoljnije. Na 0,75 met. ispod zemljine površine dnevne promjene temperature iznose najviše 2° C. Uslijed toga se kod kabela dugog 1000 km može gušenje dnevno promijeniti za $\Delta b = 0{,}17$ Nepera t. j. za iznos koji je praktično neznatan. U toku godine temperatura se mijenja do 20° C, odn. promjene gušenja iznose do 1,7 Nepera, o čemu se prilikom dnevne revizije amplifikatora vodi računa.

Pojačanje jednog amplifikatora mjeri se najjednostavnije na slijedeći način: Oscilator *S* vezan je paralelno sa promjenljivim gu-



Slika 83

šenjem i fiksnim gušenjem u čijoj je sredini uključen amplifikator (sl. 83). Valni otpori ovih gušenja odgovaraju od prilike valnim otporima linija između kojih amplifikator normalno radi. Na drugom kraju nalazi se slušalica *F* koja se pomoću preklopca *U* može uključiti na oba pravca. Promjenljivo gušenje dotle se mijenja, dok se u slušalici ne dobije ton iste jakosti u oba položaja prekidača, što znači da je ekvivalent prenosa u grani u kojoj je amplifikator ($2\ b'_2$ — s) jednak udešenom gušenju u grani u kojoj je promjenljivo gušenje. Aparatura je udešena tako, da stupnji promjenljivog gušenja pokazuju odmah gornju razliku t. j. mjereno pojačanje. Pomoću još jednog preklopca može se kod mjerenja pojačanja dvožičnih amplifikatora mijenjati pravac prenosa energije, da se amplifikator može ispitati u obadva govorna pravca.

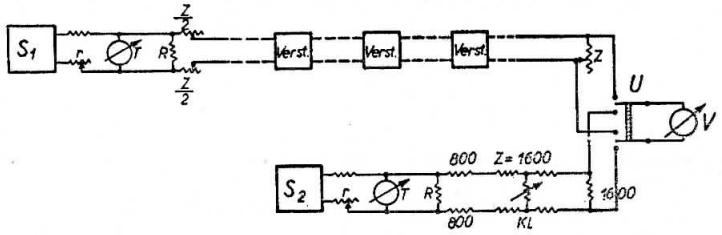
Oscilator sa cijevima je jedan amplifikatorski uređaj sa namjerno izvedenom povratnom spregom, koji zviždi sa tonom određene visine, koja je određena jednim krugom rezonancije uključenim na kojem bilo mjestu na putu povratne sprege.

Točniji rezultati dobivaju se, kad se mjesto slušalice uključi volmetar sa cijevima. Djelovanje ovoga instrumenta za mjerenje



objasniti ćemo pomoću slike 61a. Ako se za jednu amplifikatorsku cijev uzme takav rešetkin napon, da se dođe na donje koljeno karakteristike $E_G/I_A$ to će izmjenični naponi koji dođu na rešetkin krug izazvati nesimetrične promjene anodne struje (još više nesimetrične nego što je krivulja struje 2 nacrtana točkama i crtama) a prema tome i povećanje srednje vrijednosti anodne struje, koju pokazuje jedan osjetljivi galvanometar uključen u anodni krug. Kod mjerenja gušenja pomoću voltmetra sa cijevima umjetno gušenje $\beta l_2$ dotle se mijenja, dok kazaljka galvanometra ne pokaže isti otklon za obadva položaja preklopca *U*.

Ekvivalent prenosa telefonske linije koja radi sa amplifikatorima, određuje se prema slici 84 na slijedeći način: Sa jednog kraja telefonske linije šalje se struja tonske frekvencije iz oscilatora *S*,



Slika 84

koji radi preko razmjerno malog otpora *R*. Jakost struje, koja protječe kroz ovaj otpor, regulira se pomoću promjenljivog otpora *r* tako, da pad napona na otporu *R*, koji se čita na galvanometru sa termoelementom T, iznosi na pr. 2 Volta. Mali omski otpor može se shvatiti kao izvor izmjenične elektromotorne sile od 2 V, koja djeluje na liniju čiji je valni otpor *Z* a preko dva istovremeno promjenljiva otpora. Ako ove posljednje reguliramo tako da svaki ima vrijednost $\frac{Z}{2}$ onda je izvor struje udešen sa telefonskom linijom (*R* se može zanemariti u odnosu prema *Z*) i na ulazu na međugradsku liniju inzositi će napon 1 Volt (vidjeti sliku 62). Na drugom kraju linija se zatvori pomoću promjenljivog omskog otpora, koji se regulira na vrijednost *Z*. Na ovaj otpor priključi se pomoću preklopca *U* jedan voltmetar V sa cijevima sa vrlo visokim ulaznim omskim otporom. Kazaljka ovoga voltmetra zauzeti će izvjestan položaj prema naponu koji postoji na završnom otporu. Drugi jedan oscilator sa cijevima $S_2$, koji radi točno kao i prvi, šalje isti izmjenični

napon od 1 Volta preko umjetne linije *KL* koja ima fiksni valni otpor (na pr. $Z = 1600$ Oma) i promjenljivo gušenje. Ova umjetna linija zatvorena je na kraju pomoću omskog otpora čija je vrijednost jednaka valnom otporu umjetne linije. Preklopcem *U* može se voltmetar prebaciti i na jednu i na drugu stranu. Gušenje umjetne linije dotle se mijenja, dok voltmetar ne pokaže za obadva položaja isti otklon. Tada je ekvivalent prenosa telefonske linije jednak nareguliranom gušenju umjetne linije.

Vidjeli smo ranije, da zbog preslušavanja treba po mogućnosti održati dijagram nivoa prenosa. Dakle, moramo biti u stanju da za vrijeme rada kontroliramo napon iza svakog amplifikatora. Za ovu svrhu služi u svakoj amplifikatorskoj stanici aparat za mjerenje nivoa (nešto izmijenjen desni dio sl. 84). Završni otpori ispred preklopca *U* otpadaju, voltmetar *V* ima naročito visok ulazni otpor (okruglo 200.000 Oma). Ovo je potrebno da se u svima amplifikatorskim stanicama može istodobno mjeriti napon, a da se oduzimanjem energije ne smeta saobraćaju.

## 10. PRELAZNA STANJA. TIPOVI LINIJA ZA DALEKU TELEFONIJU PO KABLOVIMA

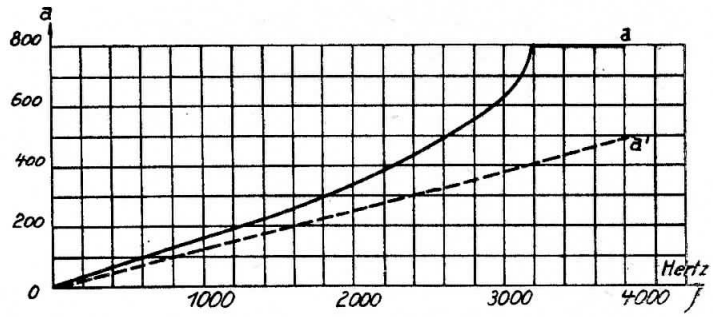
Znamo da prije nastupanja jednomjernog (stacioniranog) stanja, titranja prolaze kroz jedno prelazno stanje. Titranja izmjenične struje izazvana glasom prostiru se po liniji određenom brzinom. Dakle, prođe jedno izvjesno vrijeme $T = \frac{l}{v} = \frac{a}{2\pi f}$ dok val dođe do kraja linije duge 1 km. Kod homogene linije bez gubitka, sa jako povećanom samoindukcijom, kutna mjera *a* proporcionalna je frekvenciji, dakle brzina $v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ i vrijeme $T = l\sqrt{L \cdot C}$ nezavisni su od frekvencije. Kod idealne homogene linije, koja je ekvivalentna normalnom Pupinovom kabelu iznosi $v = 16.000$ km/s, a vrijeme potrebno da val prijeđe daljinu od 1000 km. iznosi $T \approx {}^1/_{16}$ s. U tom slučaju promjene struje dolaze na kraj linije sa točno suprotnim odnosom faza od onoga odnosa sa kojim su pošle u liniju. Slika govora, koja je u ostalom vjerna, samo je u vremenu pomaknuta za ${}^1/_{16}$ sekunde.

Kod stvarne Pupinove linije valna konstanta *a* raste sa frekvencijama po krivulji u slici 62, kad se te frekvencije nalaze ispod gra-



nične frekvencije. U slici 85 krivulja *a* pokazuje porast kutne mjere u ovisnosti o frekvenciji kod jedne normalne Pupinove linije duge 500 km. čija je granična frekvecija 3200 Herca; pravac *a'* odnosi se na ekvivalentnu homogenu liniju. Fazna brzina, dakle pada kod djelomičnih titranja govornih struja viših frekvencija a vrijeme pomicanja faze raste. Niskofrekventni sastavni dijelovi dolazeće govorne struje stižu prvi, a istom poslije stižu oni sa višim frekvencijama (to je t. zv. distorzija faza ili distorzija druge vrste).

Donji oscilogram u slici 86 predstavlja snimak na početku umjetne normalne pupinizirane linije duge 500 km, u koju se šalje niz oscilacija sa osnovnom frekvencijom od 950 Herca a za vrijeme od 27 milisenkunda (ms). U sredini je snimak znaka primljenog na

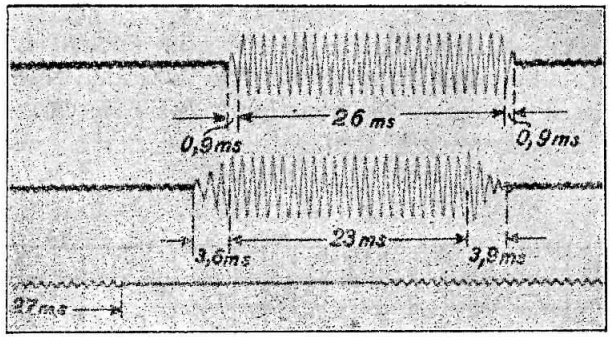


Slika 85

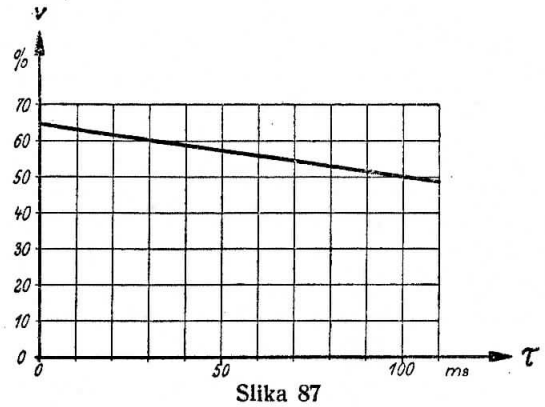
kraju linije. Vidimo jasno da titranja koja su prva došla imaju nešto veću valnu duljinu. Prijelazno stanje traje 3,6 ms, a prijelazno stanje kod prestanka traje 3,9 ms; ukupno trajanje znaka produljeno je na 30,5 ms, dok dolazna struja oscilira sa punom amplitudom svega 23 ms. Znači da su za puno djelovanje na kraju linije izgubljene 4 ms. Trajanje prelaznog stanja raste sa duljinom linije; u istoj mjeri postaje lošija reprodukcija kratkih suglasnika, čija se konfigurcija u opće ne može potpuno izgraditi na kraju linije, pa odatle razumljivost postaje slabija.

Što je viša frekvencija promatranog djelomičnog titranja gogovorne struje, to je ona bliža graničnoj frekvenciji, to će se jače razilaziti krivulja *a* od krivulje *a'* (sl. 85) i opisane pojave javljaju se u toliko jačoj mjeri. I iz ovoga razloga naročito je loše prenošenje oštrih suglasnika koji imaju karakteristična djelomična titranja (harmoničke) viših frekvencija (odjeljak 1). Može se u opće reći: Što je pupinizirana linija dulja, to će na širji pojas frekven-

cija (koje se nalaze ispod granične frekvencije), loše utjecati pojavi prelaznog stanja. Protiv toga nema nikakvog drugog sredstva osim da se granična frekvencija što dalje pomakne, t. j. po jednadžbi 43 da se smanje ili razmaci Pupinovih ovojnica, a prema tome i kapacitet kabela između ovojnica, ili samoindukcija ovojnica. Pretpostavlja se, da se pupiniziranje razmjerno malog broja vrlo dugih linija




Slika 86




Slika 87

izvrši u istim točkama, kao i normalno pupiniziranje, dakle sa ovojnicama manje samoindukcije. Na ovaj način svakako raste konstanta gušenja $\beta$ Pupinove linije ako promjer vodova ostane isti (jedn. 45) i zbog toga se kod vrlo dugih linija amplifikatori moraju postaviti na kračim razmacima. — Strogo uzevši morao bi se uzeti u obzir i pomak faza u amplifikatorima, ali to možemo zanemariti, pošto je taj pomak prilično neovisan o frekvenciji u oblasti frekvencija koje nas interesiraju.



Pitanje je, kolika se mora uzeti granična frekvencija $f_0$ za određenu duljinu linije $l$, da pojave prelaznog stanja ne utječu štetno na preneseni govor? Pošto trajanje prelaznog stanja $\tau$ raste sa frekvencijom, važno je, da ono za najvišu frekvenciju $f_1$, koja se ima prenijeti, ne pređe jednu dopuštenu mjeru danu iskustvom. Slika 87 predstavlja ovisnost razumljivosti slogova o trajanju prelaznog stanja za najvišu frekvenciju $f_1 = 2100$ Herca. Vidi se da bi bilo opasno ići preko $\tau = 20$ ms. Po jednoj formuli koju daje Western Electric Co. za Pupinovu liniju vrijedi odnos:

$$\tau = \frac{l}{\pi s f_0}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{f_1}{f}\right)^2}} - 1\right) \cdot *) \qquad (180)$$

Za $s = 2$ km. $f_1 = 2100$ Herca i $\tau_1 = 10$ ms, $\tau_2 = 20$ ms, $\tau_3 = 30$ ms, dobivaju se krivulje nacrtane u slici 84, koje predstavljaju ovisnost granične frekvencije $f_0$ o duljini linije $l$.

U dosadašnjem njemačkom sistemu pupiniziranja iznosi granična frekvencija stvarnog kruga sa vodovima od 1,4 mm 2750 Herca, a za fantomni krug 3500 Herca. Ako se dopusti, za 2100 Herca trajanje prelaznog stanja 20 ms, onda će daljina dometa stvarnog kruga iznositi 850 km, a fantomnog kruga 2100 km, t. j. biti će 2,5 puta veća.

Granična frekvencija, koja se dobiva kod normalnog (»srednje teškog«) pupiniziranja stvarnog kruga, omogućava prema tome do-

*) Za male oblasti frekvencija možemo i kod Pupinovih linija staviti da je $\frac{da}{df}$ const. Trajanje razprostiranja promatranog titranja iznosi $T = \frac{da}{2\pi df}$. Ako promatramo jedan znak određene frekvencije $f_1$, koji treba poslati linijom, to će dio znaka koji treba da se reproducira na kraju linije, i koji sadrži u sebi glavni dio energije, stići na kraj linije za vrijeme $T_1 = \frac{da}{2\pi df_{(f=f)_1}}$ i na taj način prelazno stanje može se smatrati kao svršeno. Ovo stanje počinje onda kad stignu do kraja titranja čije je trajanje razprostiranja najmanje ($T_2$), t. j. prema gornjim razmatranjima to će biti titranje sa frekvencijom $f_2 = 0$. Razlika obadva trajanja predstavljati će trajanje prelaznog stanja $\tau$.

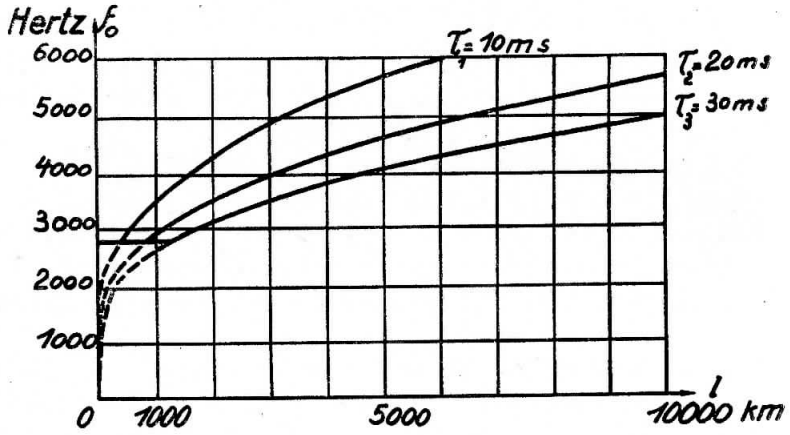
Za Pupinove linije je $a = \frac{2l}{s} \arcsin\left(\frac{f}{f_0}\right)$

$$\frac{da}{2\pi df} = \frac{l}{\pi s f_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2}}$$

$$\tau = T_1 - T_2 = \frac{l}{\pi s f_0}\left(\frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2_{f=f_1}}} - \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{f}{f_0}\right)^2_{f=0}}}\right)$$

bro sporazumijevanje do 850 km. duljine, što otprilike odgovara sadašnjoj graničnoj udaljenosti za telefoniju po duplim linijama. Za najveće moguće udaljenosti u Evropi od 4500 km. bila bi dovoljna granična frekvencija od 4400 Herca, ali su se poštanske uprave odlučile, da za vrlo velike daljine primijene još lakše pupiniziranje vodova od 0,9 mm sa $f_0 \geqq 5350$ Herca. Pojedinosti o internacionalno standardiziranim sistemima za »lako« pupiniziranje naći će čitaoc u tablici.

Konstante gušenja ovh tipova linija nisu točno dva puta veće od konstanta normalno pupiniziranih vodova promjera 0,9 mm.



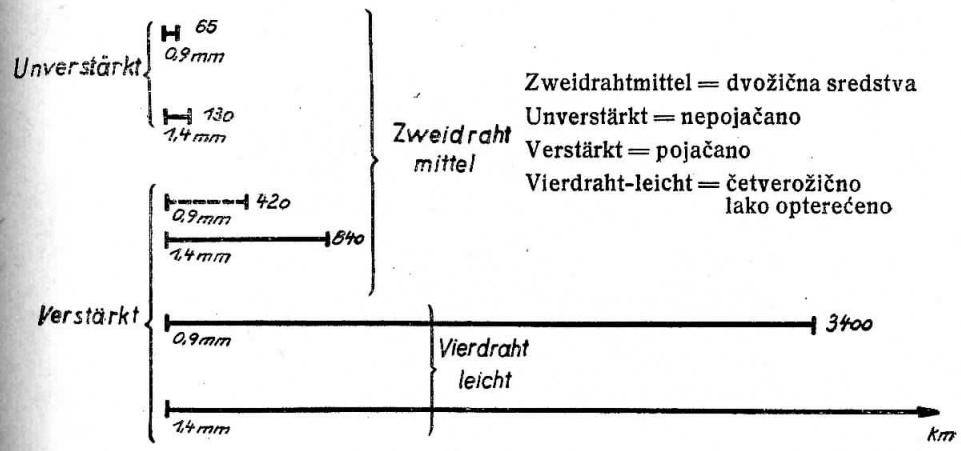

Slika 88

S toga se lako pupinizirane linije za daleku telefoniju pojačavaju u svakoj glavnoj i sporednoj amplifikatorskoj stanici, t. j. prosječno na svakih 70 km. Gušenje amplifikatorskih polja iznosi prosječno $b = 2{,}1$ do 2,65 Nepera za 600 Herca, a amplifikatori za četverožične linije prema odjeljku 8 i 9 omogućavaju za ovu frekvenciju pojačanje od $s = 2{,}8$ Nepera. Dakle, amplifikatori potrebni za četverožične lako pupinizirane daleke linije, dobro se prilagođavaju rasporedu amplifikatorskih stanica za normalno pupinizirane dvožične linije.

Tipovi linija mogu se kategorirati u ovisnosti o njihovim duljinama, a za prosječni razmak amplifikatora od 70 km, na slijedeći način: Do 65 km dvožične linije sa normalno pupiniziranim vodovima od 0,9 mm bez pojačanja ($b \approx 1{,}3$ Nepera); od 65 do 130 km dvožične linije sa normalno pupiniziranim vodovima od 1,4 mm bez pojačanja ($b \approx 1{,}3$ Nepera); od 130 do 840 km. dvožične linije sa normalno pupiniziranim vodovima od 1,4 mm sa 1 do 5 amplifikatora



na prosječnom razmaku od 140 km (gušenje amplifikatorskog polja $b \approx 1{,}4$ Nepera, amplifikatori samo u glavnim amplifikatorskim stanicama). Naravno da se za srednje udaljenosti mogu upotrijebiti i vodovi od 0,9 mm sa amplifikatorima na svakih 70 km (gušenje amplifikatorskog polja $b_0 \approx 1{,}4$ Nepera, amplifikatori u svakoj stanici amplifikatorskoj); ali je ipak upotreba vodova od 1,4 mm za dvožičnu telefoniju sa amplifikatorima u glavnom ekonomičnija. Za udaljenosti preko 840 km u prvom se redu upotrebljuju četverožične linije sa lako pupiniziranim vodovima od 0,9 mm. Razmak amplifikatorskih stanica iznosi prosječno 70 km. (Gušenje amplifikatorskog

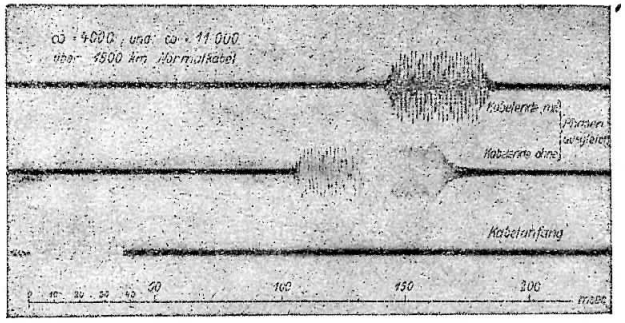



Slika 89

polja $b_0 \approx 2{,}1$ do 2,65 Nepera). Upotreba vodova od 1,4 mm sa dvostruko većim razmakom amplifikatora za četverožične linije nije za preporuku iz ekonomskih razloga, sve dotle dok su u saobraćajno tehničkom pogledu dovoljni vodovi sa promjerom od 0,9 mm. Daljina telefoniranja određena je najvećim mogućim brojem amplifikatora koji se mogu vezati u red. O ovome broju nemamo još praktičnih iskustava; ali je on ograničen prije svega obzirima na saobraćajnu sigurnost, dakle ovisan je o pouzdanosti osoblja u amplifikatorskim stanicama. Uzmimo na pr. da taj najveći broj iznosi 50 amplifikatora, u tom slučaju mogli bi upotrijebiti do udaljenosti od 3400 km vodove od 0,9 mm sa prosječnim razmakom amplifikatora od 70 km. Preko ovog razmaka mogli bi se upotrijebiti lako pupinizirani vodovi od 1,4 mm sa amplifikatorima na razmaku od 140 km. Slika 85 prikazuje ovo što je do sad rečeno.

U saobraćaju još ima normalno pupiniziranih četverožičnih linija, koje su prije bile upotrebljavane za daljine do 1000 km. Gore navedeni najnoviji rezultati za sad govore protiv njihove takve upotrebe, ali će se one pomoću niže opisanog »izjednačenja faza« moći pretvoriti u prvorazredne telefonske linije.

K. Küpfmüller (Siemens i Halske) pokazao je 1923 godine nov način, koji omogućava, da se na svima udaljenostima, koje dolaze u obzir u Evropi, primijeni, mnogo ekonomičnije, normalno pupiniziranje i to na sada normalnim vodovima od 0,9 i 1,4 mm. (odn. 1,3 mm) a bez sporednih amplifikatorskih stanica. Na ovaj način kod amplifikatora ukopčavaju se u liniju naročite umjetne linije, koje na suprot pupiniziranoj liniji imaju tu osobinu, da jače usporuju



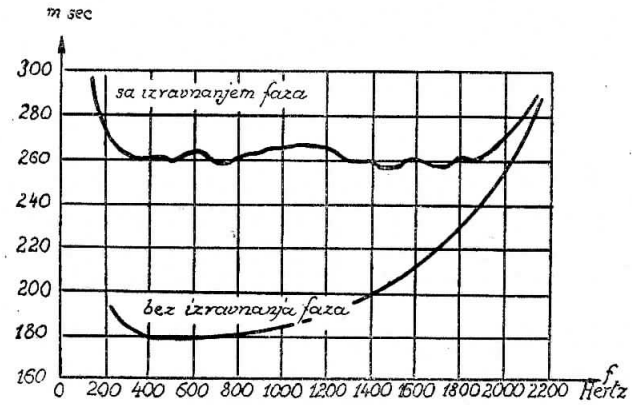

Slika 90

niskofrekventna djelomična titranja nego visokofrekventna. Na ovaj se način može postići to da sva važna djelomična titranja imaju isto rezultantno vrijeme pomaka faza, t. j. da se otkloni svaka distorzija faza i ovako prelazno stanje. Umjetne linije za izjednačenje odlikuju se time, što su ukršteni paralelno vezani elementi. U najjednostavnijem slučaju ovakva umjetna linija sastoji se iz kondenzatora, koji se spajaju paralelno sa linijom i samoindukcija, koje se spajaju u red. Kompliciranije sprege ovih elemenata daju bolje rezultate: kraj defaziranja različitih djelomičnih titranja, još i valni otpor manje ovisan o frekvenciji i malo gušenje, da se ne bi uslijed ovih članova prouzrokovale kakve dopunske distorzije uslijed povratne sprege ili distorzije amplituda (odjeljak 9). Sve šeme ovih umjetnih linija imaju kao zajedničko ukrsno spajanje paralelno vezanih članova i reciprocitet elemenata upotrebljenih kao članova vezanih u red ili paralelno. Jednom kondenzatoru vezanom u red odgovara samoindukcija vezana paralelno i obratno.



Daljim kombiniranjem ovih umjetnih linija uspjelo je kompenzirati prije spomenutu distorziju faza nižih govornih frekvencija, koja nastaje uslijed amplifikatora.

Oscilogram u slici 86 pokazuje rezultat na jednom umjetnom, normalno pupiniziranom kabelu od 500 km, duljine. Umetanjem elemenata za fazno izjednačenje uspjelo je, da se trajanje prelaznog stanja jednog određenog znaka izvedenog izmjeničnom strujom ($f$ = 950 Herca) smanji na 0,9 ms, t. j. na četvrtinu.




Slika 91

Na njemačkim međugradskim kablovima vršeni su dalji pokusi čije rezultate pokazuje sl. 90. Bio je upotrijebljen normalno pupinizirani kabel od 1800 km duljine. U liniju su poslana istovremeno dva znaka od 640 i 1700 Herca (donji dio sl. 91). Bez faznog izjednačenja na kraj kabela došao je prije niskofrekventni znak nego visokofrekventni. Obadva znaka razdvojila su se kao što se to vidi u sredini sl. 90. Pošto je ugrađen uređaj za izjednačenje faza na kraju kabela primljen je skoro isti znak kao na početku kabela (gornji dio sl. 90). Donja krivulja u sl. 91 pokazuje drugi primjerak za trajanje rasprostiranja faze u normalno pupiniziranom kabelu duljine 3000 km., a gornja krivulja predstavlja na istom kabelu samo sa primjenom sredstva za izjednačenje faza.

## 11. POJAVE ODJEKA

Posljednja poteškoća koja se mora svladati u daljinskoj telefoniji jesu tako zvani pojavi odjeka. U odjeljku 10 spomenuli smo, da se u normalno pupiniziranoj liniji valovi rasprostiru brzinom od okruglo 16000 km/s; poslije $^1/_{16}$ s valovi prijeđu 1000 km normalno pu-

pinizirane četverožične linije. Za izvjesne frekvencije ne slažu se prividni otpori umjetnih linija i duplih fizičkih linija priključenih na četverožične linije s razloga navedenih u odjeljku 2 i 9. Uslijed toga nastaju struje povratne sprege u onoj grani četverožične linije koja služi za govor u obrnutom pravcu. Ove struje dolaze na početak četverožične linije za $^1/_{16}$ s. To znači da govornik na početku linije čuje prvi odjek poslije $^1/_8$ s (ako se zanemari kratka duljina dvožične linije). Pojav se ponavlja na mostu na početku linije i onaj koji na kraju sluša ćuti će prvi eho poslije $^3/_{16}$ s odn. $^1/_8$ s poslije dolaska same govorne struje. Odjek djeluje neprijatno na onoga koji govori a otežava razumijevanje onome koji sluša. Poslije prvog odjeka $^1/_8$ s kasnije dolazi drugi odjek i t. d. Slijedeći odjeci imaju neznatno djelovanje zbog velikog gušenja.

Prvi način da se otkloni ova poteškoća sastojao se u tome da se je smanjio vremenski interval između dolaska prvog odjeka na polaznom odn. dolaznom mjestu i odlaska odnosno dolaska same govorne struje. Ovaj interval iznosi kod linija sa jako povećanom samoindukcijom $2\ T = \frac{2l}{v} \approx 2\ l \sqrt{L \cdot C}$ Kod Pupinovih linija je $\sqrt{L \cdot C} = \frac{1}{s} \sqrt{L_0 \cdot C_0} = \frac{1}{\pi s f_0}$ (jedn. 41) dakle:

$$2\ T \approx \frac{2l}{\pi s f_0}, \qquad (181)$$

t. j. vrijeme rasprostiranja odjeka skraćuje se kad se poveća granična frekvencija. Ako uzmemo lako pupiniziranje spomenuto u odjeljku 10, sa otprilike dvostrukom normalnom graničnom frekvencijom to će još uvijek vremenski interval između govora i prvog odjeka iznositi $^1/_{16}$ s za daljinu od 1000 km. Pošto je trajanje jednog vokala prosječno $^1/_{10}$ s a konsonanta $^1/_{20}$ s, odjek će u ovom slučaju znatno smetati.

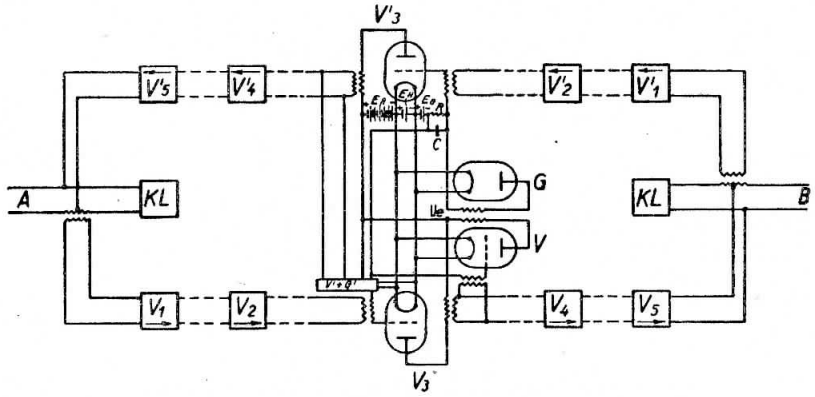
Na sreću posljednjih godina sa raznih strana pokazani su načini, da se pomoću govornih struja, koje teku u jednom pravcu četverožične linije, isključe amplifikatori za suprotni pravac i tako zatvori put za struje odjeka. To se principijelno može izvesti na taj način, što će struja, koju pojača jedan amplifikator, djelovati na jedan rele čiji će kontakti načiniti kratki spoj na liniji za suprotni pravac.

Slika 92 pokazuje uređaj za spriječavanje odjeka tipa firme Siemens i Halske. Ovaj uređaj ima usmjerivače sa cijevima. Najjednostavniji oblik usmjerivača s cijevima visokog vakuma sastoji se iz jedne usijane katode i jedne cilindrične anode koja se nalazi oko



katode. Katoda i anoda nalaze se u staklenoj evakuiranoj posudi. Ako stavimo izmjenični napon na obje spomenute elektrode, to će »pozitivni« poluvalovi ovoga napona, koji daju anodi u odnosu prema katodi pozitivan napon, uslijed čega pozitivno nabijena anoda privlači negativne elektrone koje šalje nit, prouzrokovati struju u smijeru katode. Negativni poluvalovi daju anodi u odnosu prema katodi negativan napon, te prouzrokuju odbijanje elektrona koje šalje katoda i ovi se vraćaju na nit. Prema tome samo pozitivni poluvalovi izmjeničnog napona u usmjerivačkoj cijevi prouzrokuju isprekidanu struju promjenljive jakosti ali istog smijera.

U uređaju za sprječavanje odjeka, prema sl. 92 jedan dio govornih struja sa govornog pravca *A—B* pojačanih u amplifikatoru $V_3$

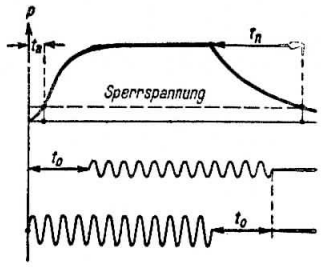



Slika 92

djeluje preko amplifikatora *V* vezanog paralelno sa linijom i preko posrednog translatora $U_e$ na mrežicu *G* usmjerivačke cijevi, čija je anoda preko sekundarnog namotaja translatora *Ue* vezana sa mrežnim namotajem ulaznog translatora amplifikatora $V'_3$, koji služi za suprotni govorni pravac *B—A*. Veza sa negativnim polom zajedničke rešetkine baterije amplifikatora $E_G$ izvršena je preko otpora *R*. Mrežica amplifikatora $V_3$ ima očevidno isti srednji potencijal kao i anoda usmjerivača G; obadvije imaju prema usijanoj katodi negativni napon $E_G$. U stanju mirovanja usmjerivača kroz otpor *R* neće teći nikakva struja, pa neće biti ni pada napona.

Ako sad naponi govorne struje, koji polaze sa stanice *A* i bivaju pojačani u amplifikatorima $V_3$ i *V*, dođu na usmjerivačku cijev *G*, onda će pozitivni poluvalovi ovih napona, savlađujući negativni napon anode $E_G$, prouzrokovati struju u cijevi, koja će se zatvoriti

preko otpora $R$. Jedan kondenzator $C$, paralelno vezan sa otporom, prima oscilacije struje u usmjerivaču tako, da kroz otpor protječe približno istosmjerna struja, (jednaka srednjoj vrijednosti poluvalova usmjerivačeve struje). Pad napona, koji nastaje u otporu, snizuje potencijal rešetke amplifikatorske cijevi $V'_3$ u odnosu prema potencijalu negativnog pola zajedničke rešetkine baterije amplifikatorskog uređaja. Uslijed toga će ovaj rešetkin potencijal biti tako jako pomaknut u smijeru negativnih vrijednosti (za 40 do 60 Volti), da će anodna struja ovoga amplifikatora biti potpuno prigušena, pa i onda kad struje odjeka, koje dolaze sa desnoga mosta, povremeno podignu malo mrežni potencijal. Mrežni potencijal ostaje uvijek ispod vrijednosti za koju je protjecanje anodne struje moguće (— 18 Volti). Amplifikator koji je blokiran, zaustavlja struje odjeka.




Slika 93

Isto zaštitno djelovanje za suprotni govorni pravac vrši usmjerivačka cijev $G'$, koja je namještena između amplifikatora $V'_3$ za govorni pravac $B$—$A$ i amplifikatora $V_3$ za govorni pravac $A$—$B$. Ovaj usmjerivač sa svojim pomoćnim amplifikatorom predstavljen je samo jednim pravokutnikom u sl. 92.

Kombinacija otpora $R$ i kapaciteta $C$ u biti je nešto kompliciranija i ona ima još to djelovanje, da se promjene rešetkinog potencijala kod onoga amplifikatora, koji se mora blokirati ne vrše odjednom, pa da uslijed toga ne nastanu impulsi u strujnom krugu suprotnog govornog pravca, koji mogu praviti smetnju. Kod uređaja za sprječavanje odjeka uređeno je, da prođe izvjesno vrijeme $t_n$ prije nego što se na rešetki amplifikatora za suprotni pravac uspostavi napon koji spriječava protjecanje anodne struje. Isto tako prođe jedno izvjesno vrijeme $t_n$ i polije prolaska govornih struja kroz amplifikator koji upravlja uređajem za sprječavanje odjeka dok se ne dođe ispod napona koji sprječava prolaz anodne struje (sl. 93). Vrijeme $t_a$ mora biti kraće nego vrijeme $2T$ potrebno da se



odjek preko mosta vrati na amplifikator koji treba blokirati, pošto bi se inače struje odjeka bar djelomično mogle provući kroz amplifikator. S istog razloga mora biti $t_n > 2\,T$. Ako bi se vrijeme $t_n$ povećalo preko 0,1 sek. pri brzom uzajamnom razgovaranju osjećala bi se smetnja. Vremena $t_a$ i $t_n$ udešavaju se zgodnim odmjerivanjem otpora i kondenzatora koji se stavljaju u mrežni krug amplifikatora, koji se ima blokirati. Zbog konačne vrijednosti vremena $t_a$ ne smiju se uređaji za sprječavanje odjeka postavljati u stanicama gdje se nalaze mostovi (prelazni sa četverožične na dvožičnu liniju). a ne smiju biti ni previše daleko od ovih pošto vrijeme $t_n$ ne može biti previše dugo. Prema jedn. 181 dobiva se kod normalnog pupiniziranja udaljenosti od $\leq$ 850 km (6 amplifikatorskih polja) a za lako pupiniziranje $\leq$ 1650 km (23 amplifikatorska polja). Ako četverožične linije nisu previše duge, uređaji za spriječavanje odjeka mogu se postaviti za obadva govorna pravca u jednoj amplifikatorskoj stanici u sredini linije; kao što je uzeto u sl. 92. Naprotiv, kod vrlo dugih linija, uređaj se mora razdvojiti i postaviti u dvije prostorno odvojene amplifikatorske stanice.

Kod dvožičnih linija svaki amplifikator može biti povod za pojave odjeka uslijed struja povratne sprege, kao što je to objašnjeno u odjeljku 9; ali ovi pojavi nisu od štetnog utjecaja, pošto je vrijeme rasprostiranja tih struja kratko.

K R A J

**JUGOSLAVENSKO INDUSTRIJSKO I TRGOVAČKO D. D. — ZAGREB**

**Washingtonov trg I (prije Trg Burze) Tel. 26-67 i 20-17**

Generalno zastupstvo

**TT. ROBERT BOSCH A. G., STUTTGART**

**Prodaja:** Svih Bosch proizvoda, Seiberling guma, svakovrsnog auto pribora (naročito za Buick automobile)

*Specijalna Bosch radiona za popravke*

**„PAKETOŠPED"**

TRANSPORTNO I PAKETSKO PODUZEĆE

**ERVIN MONDECAR**

Brzojavi: Paketošped ZAGREB: Telefon 6068

Račun kod poštanske štedionice 36583 Zagreb. Tek. račun: Jugoslavenska banka d. d. Zagreb. — Zastupstva u svim većim mjestima države PREUZIMA: Sve vrste selenja sa pokućtvenim i platonskim kolima. Prevoz u gradu, sa stanice i obratno. — OCARINJUJE: Poštanske pošiljke, komadnu i vagonsku robu za inontranstvo i obratno. OSIGURAVA: Na zahtjev svaku pošiljku.

**ŠENOINA UL. 21 ZAGREB TELEFON 6068**

**WEISSKOPF & SCHWARZ d. s. o. j**

**FILIJALA ZAGREB BOŠKOVIĆEVA 42, Telef. 94-48**

GLAVNO ZASTUPSTVO

**HORROCKSES, CREWDSON & Co.Ltd.**

**Manchester**

**M I X & G E N E S T A. G.**

**BERLIN SCHÖNEBERG, Geneststr 5.**

PROIZVODI: manuelne i automatske telefonske centrale do najvećih kapaciteta, kao i sav telefonski pribor i aparate, postrojenja za signalizaciju, kontrolu, osiguranja od požara i provale i t. d., pneumatičke i elektropošte, beskrajna prenosna platna, dizalice za akta, postrojenja za sortiranje pisama i dr.

**ZASTUPNIK ZA JUGOSLAVIJU**

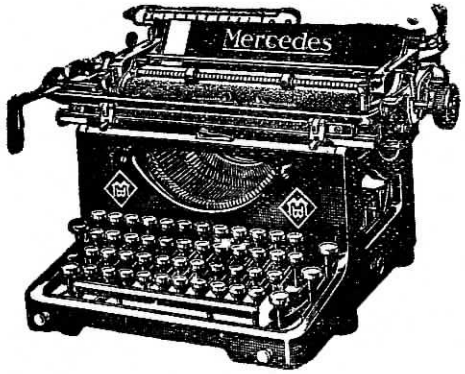
**Ovlašćeni elektro-mašinski inženjer**

**VLADIMIR R. PUTNIK**

**BEOGRAD-Carice Milice 12** **Telefon 26-040**

**J. GLAD – MERCEDES**

ZAGREB, NIKOLIĆEVA 14 - TEL. 26-14




**Mercedes Express**

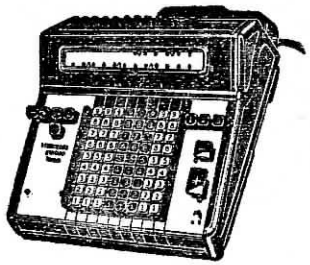
najusavršeniji

bezbučni

pisaći stroj

bez konkurencije

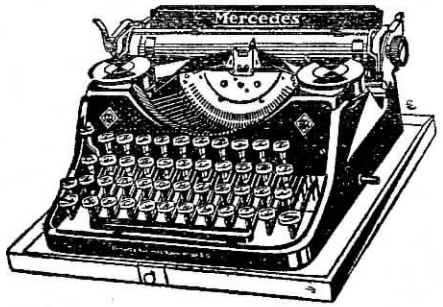
TRAŽITE PONUDE I BEZOBVEZNO PRIKAZIVANJE



**MERCEDES Portable**

putni pisaći stroj

najnovijeg tipa




**Mercedes Euklid**

100% električni i potpuno automatski računski stroj za sve vrsti računanja u 20 raznih modela najnovijeg sistema

Generalno zastupstvo

**MERCEDES, ZAGREB, NIKOLIĆEVA 14**

**PRVA JUGOSLAVENSKA TVORNICA**
**UKOČENOG DRVA D. D.**
Tvornica Sušak:

Skladišta:
BEOGRAD, Kralja Petra 54 — ZAGREB, Varšavska ul. 8
LJUBLJANA, Tiršova s. 31 — SARAJEVO, Skenderija 53

Suholjepljene šperploče i panelploče

---

*NAJVEĆE*
*SKLADIŠTE*
*PRVORAZREDNIH*
***ENGLESKIH***
***TKANINA***
*PREPORUČA*

***Turner i Pešić***

***ZAGREB***
*ILICA 9*
*TELEFON 20-49*

---

**POMISLITE** kako bi Zagreb izgledao da nema vodovoda, da nema plinare i da nema električne centrale

**SJETITE SE** dobrih starih vremena, kada je u sobama svijetlila — i zaudarala — jadna lojanica, ili skupa petrolejska svjetiljka

**IZRAČUNAJTE** koliko biste vremena, rada i novaca potrošili, da svu vodu koju trebate, iz dana u dan, ljeti i zimi, morate sa najbližeg zdenca nositi u svoj stan, koji se nalazi možda u šestom katu kakve moderne novogradnje

**PRIZNAJTE** najzad da se život u modernom velegradu ne da ni zamisliti bez vodovoda, bez plina i bez električne energije

**PODUZEĆA SLOB. I KRALJ. GLAV. GRADA ZAGREBA**

podižu životni standard svih njegovih stanovnika i potpomažu jačanje njegove komunalne djelatnosti, kao privredni i socijalni faktori prvoga reda.

**GRADSKA ELEKTRIČNA CENTRALA**
GUNDULIĆEVA ULICA 18

**GRADSKA PLINARA**
GUNDULIĆEVA ULICA 34

**GRADSKI VODOVOD**
GUNDULIĆEVA ULICA 34

---

***Najveći izbor svih svjetskih maraka***

# *Radio aparata*

***Orion Lorenz Pan***
***Tefag Radione***

***i najmodernije aparate na baterije***

# *J. HERZL*

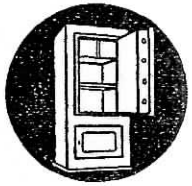
***Zastupstvo tvornica radio aparata***
***ZAGREB, Martićeva ul. 12. — Tel. 37-94***

AMERICAN COMPANY

# KONDOR

Ilica 18 ZAGREB Tel. 35-05
Stručna trgovina uredskog namještaja, pisaćih strojeva blagajna, uredskih potrebština i t. d.

**KONTINENTAL pisaćih strojeva.** Generalno zastupstvo za Banovine: Savsku, Primorsku i Vrbasku. Normalni model i putni (Portable). **ARNHEIM BLAGAJNE** glasovite marke zastupstvo. Blagajne, gradnja tresora i t. d. NAMJEŠTAJ UREDSKI: Stolovi sa i bez rolo-a, Registar ormari raznih modela, foteli, stolci, garniture, gospodske sobe itd. PISAĆI PRIBOR. Papiri svih vrsta: Kancelaj, Koncept, Prepisni, Karbon, Indigo, vrpce za strojeve, potrebštine za umnažajuće aparate, tinta i t.d. i t. d. NALIV PERA. Najbolje vrsti samo prvorazredne svjetske marke i t. d. **Mehanička radionica:** Preuzima popravke svih uredskih strojeva, blagajna, abonoma čišćenja pisaćih strojeva i t. d.





AUTOMATSKI TELEFONSKI UREĐAJI

Svakog kapaciteta za javne i privatne svrhe

TELEGRAFSKI UREĐAJI

TELEGRAFSKI PISAĆI STROJEVI

VISOKOFREKVENTNA TELEFONIJA

KABELI I POJAČALA

ZA TELEFONSKE SVRHE

JUGOSLAVENSKO

SIEMENS D. D.

ODIO ZA SLABU STRUJU

ZAGREB, Ratkajev Prolaz 7

BEOGRAD, Kralja Aleksandra 8



PRVA HRVATSKA TVORNICA ULJA
D. D. ZAGREB

proizvađa najfinije stolno ulje poznate marke

**Crvena zvijezda**

*dvostruko rafirano*

*zdravo* *čisto*

Najbolja se roba pozna po marci

Zato svugdje izričito tražite:

*zagrebačko ulje*

*„Crvena zvijezda"*

# NORIS K. D.

**Veletrgovina elektrotehničkih potrebština**

**Tvornica u osnutku**

**ZAGREB**
**Gundulićeva ulica 26**
Telefon br. 56-10, 56-11

**BEOGRAD**
**Cara Lazara ul. 10**
Telefon broj 24-691

Zastupa oko 30 svijetskih tvornica

Među njima Süddeutsche Kabelwerke. Tvornica svih vrsti kabela jake i slabe struje

**JUGOSLAVENSKA TVORNICA KABELA,**
**kojoj je V. D. E.**
**podelio „Codex" raspoznajnu nit, te vlastitu raspoznajnu nit:**

Društvo za Elektrotehniku i Fabrika kabela A. D. Zagreb. Bačvarska ul. 26. Naslov za listove: Zagreb I. pošt. pret. 113, Telefon: 4533. Brzojavni naslov: „Žice" Prodajni ured i skladište Beograd, Kosmajska 7. Brzojavni naslov: „Jugokabel" Račun kod Pošt. Štedionice Zagreb, br. 46046

**PROIZVODI**

**Vodovi sviju vrsta, za jaku i slabu struju tačno prema V. D. E. normalijama**
**Gumom izolovane žice, gajtani i kabeli, gumenocijevni vodovi, cijevne (Kuhlo) žice, autokabeli, opredeni vodovi, dinamo žice, telefonski kabeli, izolacione cijevi i pribor za iste, gole bakrene žice, bakrena užeta, izolirajuće vrpce, željezna i čelična užeta**

# AUTO- PRIBOR GUME DIJELOVI

Specijalna radiona za **vulkaniziranje** auto guma i druge gumene robe

## R. JURZA, ZAGREB

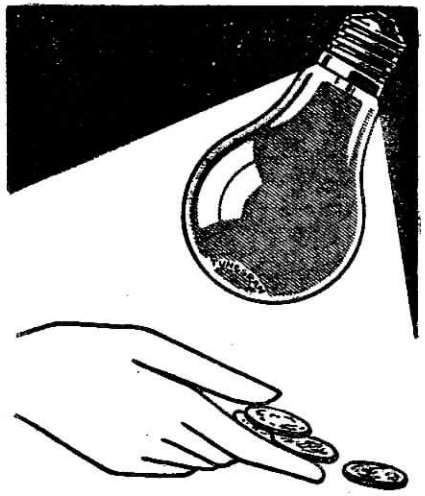
Masarikova 8 — Telef. int. 2780 — Brzojav: Gumijurza

***Najstarija zagrebačka trgovina željeza i željeznom robom***

## *FRANJO SOLAR*

***ZAGREB***

***Ilica 16 — Telefon 32-91 i 78-91***



# *Za svoj novac*

želite svjetla, kad kupujete sijalicu. Samo svjetska marka jamči Vam za ekonomičnu rasvjetu s maksimumom svjetla.

# TUNGSRAM